

UNIVERSITÀ DI PISA



Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica

Tesi di laurea

**INDAGINE SULLA FORATURA DI
PLASTICHE RINFORZATE CON FIBRA DI
CARBONIO FINALIZZATA AL
MONITORAGGIO DEL PROCESSO**

Candidato/i:

Simone Pallesi

Relatori:

Prof. Gino Dini

Ing. Luca Romoli

Sessione di Laurea del 27/02/2008

Archivio tesi Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica 07/08

Anno accademico 2007/2008

Consultazione consentita

*Vorrei ringraziare tutti coloro che hanno contribuito
alla realizzazione di questo lavoro.*

*Ringrazio quindi i relatori di questa tesi,
il Prof. Gino Dini e l'Ing. Luca Romoli,
e Flavio Antonelli per i preziosi consigli e la disponibilità.*

*Un particolare ringraziamento ai miei genitori
che mi hanno permesso di arrivare fin qui
e, per l'incoraggiamento fornitomi quando più ne avevo bisogno,
a Francesca a cui dedico tutto il mio lavoro.*

INDICE

SOMMARIO.....	IV
----------------------	-----------

INTRODUZIONE.....	V
--------------------------	----------

1. I MATERIALI COMPOSITI.....	1
--------------------------------------	----------

1.1. Premessa

1.2. Generalità sui materiali compositi

1.3. Tipologie di materiali compositi

1.3.1. Classificazione in base a tipo e forma del rinforzo

1.4. FRP (Fiber Reinforced Plastics)

1.4.1. Tipi di matrici

1.4.2. Tipi di fibre

1.5. Lavorazione delle FRP

1.5.1. Problematiche della lavorazione delle FRP

1.5.2. Lavorazione dei compositi tramite processi tradizionali e non convenzionali

1.5.2.1. Fresatura

1.5.2.2. Taglio con segatrice

1.5.2.3. Taglio waterjet

1.5.2.4. Taglio laser

1.5.2.5. Foratura, lamatura, svasatura

2. LO STATO DELL'ARTE SULLA FORATURA DELLE FRP.....	15
--	-----------

2.1. Premessa

2.2. Influenza dei vari parametri sulla foratura delle FRP

2.2.1. Velocità di taglio ed avanzamento

2.2.2. Tipologia utensile: materiale e geometria

2.2.2.1. Geometrie utensile alternative

2.2.2.2. Altri accorgimenti

2.3. Il controllo del processo di foratura su FRP

2.3.1. Reti neurali (Artificial Neural Network, ANN)

2.3.1.1. Principio di funzionamento

2.3.1.2.	Applicazioni delle ANN nella foratura delle FRP	
2.3.2.	Logica fuzzy	
2.3.2.1.	Cenni ai numeri fuzzy ed alla logica fuzzy	
2.3.2.2.	Un controllore fuzzy	
2.3.2.3.	Applicazioni della logica fuzzy	
2.3.2.4.	Applicazioni della logica fuzzy nella foratura dellr FRP	
3.	IL LABORATORIO MULTISENSORIALE.....	29
3.1.	Premessa	
3.2.	La macchina	
3.3.	Lo schema del laboratorio	
3.4.	I sensori	
3.4.1.	Piattaforma dinamometrica Kistler 9257 B	
3.4.2.	Sensore di potenza Montronix PS 100 DGM	
3.4.3.	Sensore di coppia Montronix Accue-Torque	
3.4.4.	Dinamo tachimetrica	
3.4.5.	Accelerometro Montronix Spectra Pulse	
3.5.	Acquisizione dati	
3.5.1.	Scheda di acquisizione National Instrument PCI 6250	
3.5.2.	Il software LabView 7.0	
3.5.3.	Trattamento dei dati acquisiti	
3.6.	Obiettivo del lavoro di tesi	
4.	MISURAZIONE DEL DANNEGGIAMENTO INDOTTO E DELL'USURA	
UTENSILE.....		40
4.1.	Premessa	
4.2.	Danneggiamento indotto ed usura utensile	
4.2.1.	Usura utensile	
4.2.2.	Delaminazione	
4.3.	Gli strumenti utilizzati	
4.4.	Il microscopio ottico ed il software di misura	
4.4.1.	Il microscopio Nikon SMZ800	
4.4.2.	Acquisizione immagine tramite fotocamera	
4.4.3.	L'attrezzatura di posizionamento utensile	

4.4.4. Il software EasyView	
4.4.5. Le procedure di misura	
4.4.5.1. Misura dell'usura utensile	
4.4.5.2. Misura della delaminazione	
4.5. L'illuminatore episcopico coassiale	
5. PROVE SPERIMENTALI DI FORATURA.....	60
5.1. Premessa	
5.2. Materiali utilizzati	
5.3. Classificazione ed archiviazione delle prove	
5.4. La validazione del laboratorio	
5.4.1. Foratura di prova su CFRP	
5.4.2. Prove di ripetibilità.	
5.5. Prove sperimentali su CFRP	
5.6. La campagna di prova	
6. IL CONTROLLORE.....	79
6.1. Premessa	
6.2. Il controllore a logica fuzzy	
6.2.1. Logica di funzionamento	
6.2.2. Definizione delle variabili di controllo.	
6.2.3. Definizione delle regole di inferenza.	
6.2.4. Funzionamento del controllore fuzzy	
CONCLUSIONI.....	79
SVILUPPI FUTURI.....	87
BIBLIOGRAFIA.....	89
APPENDICE A: ATTREZZATURA DI POSIZINAMENTO PUNTA SU	
MICROSCOPIO.....	90

SOMMARIO

Questo lavoro ha come oggetto l'analisi del processo di foratura di materiali compositi rinforzati con fibra di carbonio (CFRP) mediante la tecnica TCM (Tool Condition Monitoring). Questa permette di quantificare l'usura dell'utensile con il progredire della lavorazione sia direttamente tramite misure ottiche che indirettamente misurando l'andamento delle forze coinvolte nel processo e controllando nel contempo la qualità del foro realizzato. Nella prima fase il laboratorio TCM è stato validato con successo tramite numerose prove. È stato quindi realizzato un apparato di misura flessibile, basato su uno stereomicroscopio dotato di fotocamera digitale e software per l'analisi dell'immagine, in grado di effettuare misure di usura utensile e danneggiamento del laminato. Il sistema sviluppato garantisce alta precisione ed elevata ripetibilità delle misure ed è inoltre facilmente integrabile nella linea produttiva. Il suddetto sistema è stato validato con prove di ripetibilità. Nella seconda fase è stata eseguita un'analisi approfondita del processo grazie ad una ampia campagna di prove di foratura con utensile in HSS e diverse combinazioni di parametri di taglio. Le prove hanno evidenziato, per questa particolare combinazione utensile pezzo, una rilevante influenza della velocità di taglio sulla forza di penetrazione. Nell'ultima fase è stata proposta una procedura di controllo per il processo di foratura basata su logica fuzzy: questa, senza la necessità di un preciso modello matematico, fornisce una stima della delaminazione e su questa effettua la regolazione dell'avanzamento per massimizzare la produttività e la qualità del foro minimizzando i costi (tempi passivi, scarti, rotture utensile).

ABSTRACT

The aim of this work was an analysis of the carbon fiber reinforced plastics drilling process by an application of TCM (Tool Condition Monitoring) technique. This method allows the quantification of the tool wear as a function of the process time with an optical microscope and by measuring the variation of the forces applied during the process and the quality of the obtained hole.

The first step of this work consisted in several tests to validate the multi-sensor system for TCM application. Then a system which allows a quick and repeatable measurement of tool wear in addition to the delamination of composite material around the hole has been developed. The proposed system was based on a stereo microscope equipped with a digital camera and an image analysis software. Since this apparatus could represent a flexible means of measurement easily integrable into manufacturing lines. The procedure was validated by means of many repeatability tests.

In the second step of this work drilling experiments have been carried out with several combinations of different cutting parameters using HSS twist drills. Results obtained pointed out the remarkable influence of the cutting speed on the thrust force for this particular combination of piece/tool.

In the last step a control system for the drilling process has been proposed, based on fuzzy logic since the behaviour of the drilling process cannot be predicted by a mathematical model. This system allowed a prediction of the extension of surface damage and execute the regulation of the feed parameter. The fuzzy control system maximizes the productivity and the quality of the obtained hole reducing costs.

INTRODUZIONE

Nell'industria moderna, sempre più alla ricerca della diminuzione del peso e dell'aumento delle prestazioni, i materiali compositi acquistano sempre maggior importanza. Questi materiali hanno infatti caratteristiche di resistenza elevate associate ad una estrema leggerezza: ne risulta perciò un rapporto resistenza/peso notevolmente superiore a quello delle tradizionali leghe metalliche. A questa caratteristica si aggiunge anche la possibilità di poter disporre di una enorme quantità di combinazioni di matrici e rinforzi tale da soddisfare le più disparate esigenze.

In contrapposizione a tutti questi vantaggi c'è un costo di produzione elevato, dovuto soprattutto alla difficoltà nel lavorare tali materiali che vengono quasi sempre trattati "artigianalmente". Infatti sia la formatura che le eventuali successive lavorazioni di finitura vengono eseguite manualmente da personale qualificato a causa della complessità e della variabilità delle operazioni. Attualmente però si sta cercando di esportare l'automazione, già affermata per quanto riguarda le leghe metalliche, anche nella lavorazione dei materiali compositi, almeno in quelle lavorazioni più facilmente automatizzabili quali la foratura. Inoltre questi materiali sono anche difficilmente lavorabili con tecniche ed utensili tradizionali in virtù proprio delle loro elevatissime caratteristiche meccaniche ed della loro natura disomogenea: matrice e rinforzo hanno infatti caratteristiche completamente diverse e necessitano di accorgimenti differenti durante la lavorazione.

Un aiuto all'automatizzazione delle lavorazioni dei materiali compositi può derivare dal monitoraggio costante dello stato delle macchine utensili automatizzate e, più in generale dello stato della lavorazione. Questo consiste nel misurare alcune grandezze ritenute significative per il processo e modificare di conseguenza i parametri delle macchine, ottenendo una più elevata qualità della lavorazione, una riduzione dei tempi passivi ed una maggiore uniformità qualitativa dei pezzi prodotti.

In particolare il monitoraggio dello stato dell'utensile, TCM (*Tool Condition Monitoring*), consiste nel controllare lo stato dell'usura dell'utensile e dell'eventuale danneggiamento dello stesso: si riduce perciò la possibilità di rottura dell'utensile, evitando possibili danneggiamenti alla macchina, al pezzo in lavorazione e pericolo per l'operatore se presente. Ciò porta ad una riduzione anche dei costi dovuta alla riduzione dei tempi passivi, alla possibilità di riutilizzo dell'utensile (dopo rafilatura) ed al mancato scarto che nel caso dei compositi ha un costo elevato.

Il controllo dello stato dell'utensile può essere effettuato sia misurando direttamente l'usura dello stesso, sia indirettamente andando a controllare dei parametri che hanno dipendenza diretta dall'usura dell'utensile. Nel primo caso, è chiaro come le misure siano difficili se non impossibili mentre l'utensile lavora ed è quindi necessaria un interruzione del ciclo di lavoro (controlli off-line). Altrimenti, nel secondo caso, si può rilevare l'usura dell'utensile tramite la misurazione di

forze, coppie o vibrazioni che possono essere compiute anche durante il ciclo di lavoro (controlli on-line).

Essendo poi uno degli scopi del TCM quello di garantire una elevata qualità della lavorazione, i parametri relativi allo stato dell'utensile, rilevati direttamente od indirettamente, devono essere confrontati con il livello della qualità della lavorazione, così da stabilire una corrispondenza biunivoca tra i vari parametri. Per questo successivamente alla lavorazione si effettua una valutazione delle grandezze relative al pezzo ottenuto, tramite controlli dimensionali, controlli sulla finitura ottenuta o aspetti particolari di una certa lavorazione (per es. la delaminazione in foratura).

Il lavoro svolto riguarda perciò l'analisi, mediante la tecnica TCM, del processo di foratura dei materiali compositi rinforzati con fibre di carbonio e dei parametri che lo regolano. Si propone inoltre lo studio preliminare di una procedura di controllo, basata su logica fuzzy, del suddetto processo di foratura. Sfruttando lo stesso approccio si potrà estendere tale metodo anche ad altri materiali ed altri utensili.

1. I MATERIALI COMPOSITI

1.1. Premessa

I materiali compositi, inizialmente nati per soddisfare le esigenze di particolari settori dell'industria quali quella militare, aeronautica ed aerospaziale, oggi sono diffusi in molti altri campi grazie ai progressi realizzati nei loro processi produttivi ed alla conseguente riduzione dei costi.

Nei seguenti paragrafi verrà eseguita una breve rassegna dei materiali compositi concentrandosi sulle FRP (Fiber Reinforced Plastics) che sono quelli di maggiore interesse per questo lavoro.

1.2. Generalità sui materiali compositi

Non esiste la definizione univoca dei materiali compositi, comunque si può definire come materiale composito *“un sistema di materiali composto da una miscela o combinazione di due o più micro o macrocostituenti che differiscono nella forma e nella composizione chimica e che essenzialmente sono insolubili l'uno nell'altro”* [1]. L'unione di questi materiali distinti da luogo ad un materiale le cui proprietà sono globalmente superiori, o quantomeno rilevanti, rispetto a quelle di ciascuno dei singoli componenti di partenza.

Analizzando la struttura dei materiali compositi si notano le due fasi:

- matrice
- rinforzo

queste due fasi possono essere di svariate tipologie ed influenzano, sia come concentrazione che caratteristiche, le proprietà del composito risultante.

Il rinforzo è la fase discontinua (dispersa) che contribuisce nella maggior parte alla sopportazione delle sollecitazioni meccaniche ed alla determinazione della resistenza del composito nel suo complesso. La matrice rappresenta la fase continua che contiene ed orienta il rinforzo conferendogli una distribuzione spaziale ed ha il compito di proteggerlo e di trasferire i carichi.

Le caratteristiche dei materiali compositi sono notevolmente influenzati dai seguenti parametri:

- tipologia del rinforzo (particellare o fibroso);
- orientamento del rinforzo che può essere più o meno casuale generando un composito con minore o maggiore anisotropia;
- concentrazione delle due fasi

1.3. Tipologie di materiali compositi

I compositi si possono classificare in base alle tipologie di matrice, di rinforzo o in base ai componenti che li costituiscono.

1.3.1. Classificazione in base a tipo e forma del rinforzo

Analizzando la classificazione in base a tipo e forma del rinforzo si trovano due grandi categorie; i compositi particellari e rinforzati con fibre (*Fig. 1.1*).

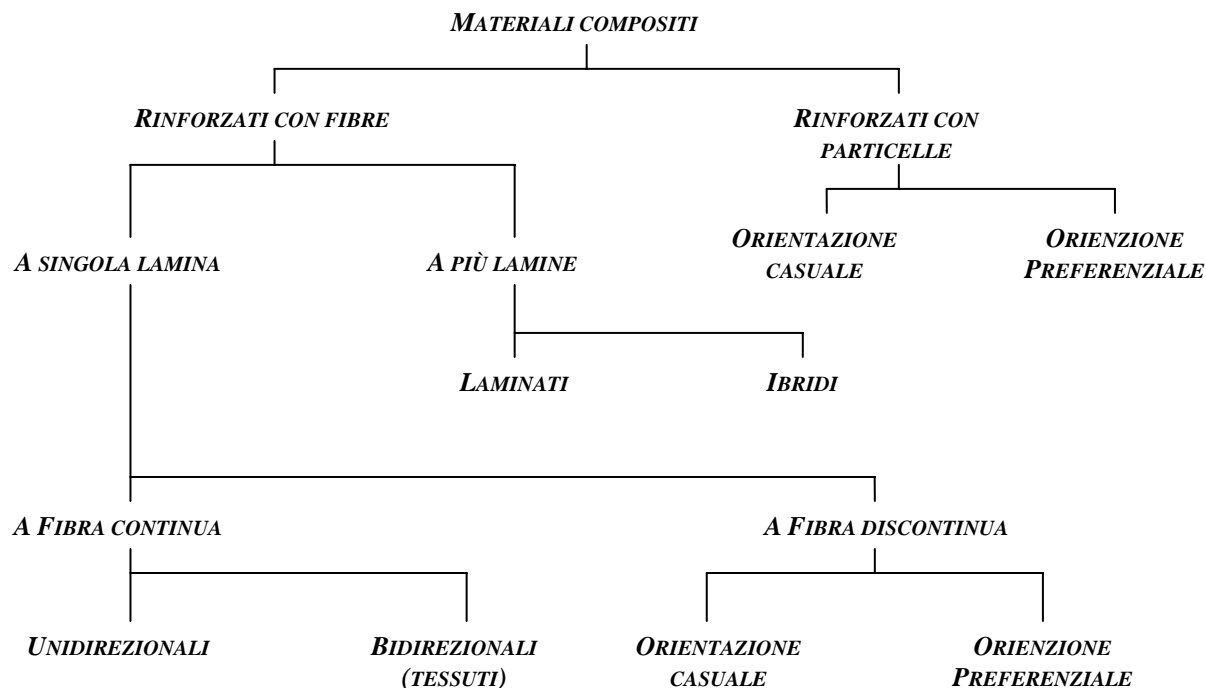


Fig. 1.1 – Classificazione dei materiali compositi in funzioni delle tipologie di rinforzo

I compositi particellari presentano disperse nella matrice delle particelle di varia forma (sferica o cristalli, whiskers) e dimensione che incrementano non tanto la resistenza a trazione (a causa dell'effetto di intaglio introdotto dalle particelle stesse) ma altre proprietà quali la resistenza ad usura alle alte temperature, la durezza superficiale o la lavorabilità alle macchine utensili. A titolo di esempio si consideri l'inserimento di particelle di carburo di tungsteno, materiale dalla elevata durezza, disperse nella matrice per realizzare un composito di elevata resistenza ad usura anche alle elevate temperature per la realizzazione di utensili per asportazione di truciolo.

I rinforzati con fibre si dividono, a loro volta, in quelli a fibra continua e a fibra discontinua. Se le fibre continue sono disposte su un unico piano e con un'unica direzione preferenziale si parla di lamina unidirezionale. Tale elemento presenta un forte grado di anisotropia nel comportamento meccanico in quanto nella direzione delle fibre la resistenza a trazione è data interamente dalle fibre, mentre nella direzione ortogonale dalla sola coesione della matrice. Per diminuire tale effetto di anisotropia si possono sovrapporre più strati monodirezionali orientati diversamente fino a comporre un composito a più lamine oppure disporre le fibre della lamina non più in un'unica direzione ma tessendole secondo una trama ed un ordito fino a realizzare un vero e proprio tessuto.

Se si utilizzano invece delle fibre corte (discontinue) si può diminuire il grado di anisotropia disponendole in maniera casuale anziché ordinata, realizzando delle lamine che possono essere considerate quasi isotrope. Non è invece altrettanto isotropo il composito realizzato con la loro sovrapposizione in quanto ha come direzione di minor resistenza quella perpendicolare alle lamine stesse dove la coesione interlaminare è debole e rappresenta un punto critico. È perciò importante durante la progettazione del manufatto in composito tener conto della sua anisotropia.

Un'altra tipologia di composito è quello con struttura a sandwich che differisce dal laminato in quanto questo normalmente è formato da lamine esterne che forniscono la dovuta resistenza meccanica con al loro interno un'anima composta da materiale a bassa densità; questo tipo di compositi viene utilizzato dove sono richieste elevate caratteristiche meccaniche ed un basso peso (per esempio nelle pale di elicottero).

1.3.2. Tipologie di compositi in base ai componenti utilizzati.

Di seguito si riporta una rassegna sintetica dei vari compositi utilizzati anche al di fuori dell'industria meccanica, realizzata classificandoli in base ai componenti utilizzati come matrice e rinforzo. Tutti i seguenti materiali rientrano nella definizione di composito data in precedenza:

- Calcestruzzo: materiale molto diffuso nell'edilizia, è un composito a matrice ceramica costituita da cemento Portland (miscela di ossido di calcio, silice, allumina e ossido di ferro) ed il rinforzo di tipo particellare è costituito da aggregati grossi (ghiaia e rocce di varia natura e dimensione) e da aggregati fini (sabbia). Ottima flessibilità di impiego e formatura, ha una notevole resistenza a compressione ma una bassa resistenza a trazione.
- Cemento armato: si utilizza il calcestruzzo come matrice e vengono aggiunte delle armature in acciaio (reti elettrosaldate, tondini e gabbie) opportunamente posizionate per compensare la bassa resistenza a trazione della matrice.
- Miscela d'asfalto: l'asfalto o bitume, miscela di idrocarburi di vario peso molecolare, costituisce la matrice dove sono affogati aggregati minerali compatti e con spigoli vivi. La funzione del composito così ottenuto è quella di aumentare la resistenza allo scivolamento e diminuendo contemporaneamente l'usura.
- Legno: è un composito già presente in natura; la matrice è costituita dalla lignina mentre il rinforzo è realizzato da complesse sequenze di fibre di cellulosa. La sua conformazione fibrosa rende il suo comportamento notevolmente anisotropo e le sue caratteristiche di resistenza meccanica sono inversamente proporzionali alla quantità di umidità contenuta al proprio interno.

- Compositi a matrice metallica (MMC): la maggior parte di questi materiali sono stati appositamente studiati per l'industria aerospaziale ma alcuni di questi vengono utilizzati per altre applicazioni quali la realizzazione di componenti per i motori automobilistici; hanno un elevato rapporto resistenza/densità. In generale, si hanno tre tipi di MMC in base al tipo di rinforzo: fibre continue, con particelle e con fibre discontinue. Tra i primi si trovano leghe di alluminio rinforzate con fibre continue di boro che ne incrementano notevolmente sia la resistenza che la rigidità senza compromettere la densità; tra i secondi (a più basso costo) leghe di alluminio ma con rinforzi di particelle di forma irregolare di allumina e carburo di silicio. Quelli rinforzati con fibre discontinue, prodotti principalmente tramite processi di metallurgia delle polveri, utilizzano come rinforzo dei whiskers aghiformi, che mescolati con la polvere di metallo vengono poi compattati a caldo e successivamente estrusi o forgiati: in questo caso le caratteristiche meccaniche sono superiori a spese di un maggior costo di produzione rispetto ai precedenti.
- Compositi a matrice ceramica: lo scopo principale di questi compositi è quello di incrementare la tenacità e la resistenza tipicamente scarsa della matrice ceramica mantenendo l'elevata resistenza alla temperatura ed alla usura dei ceramici. Tale obiettivo viene raggiunto anche in questo caso mediante un rinforzo a fibra continua, discontinua o particellare; grazie in maggior parte all'effetto di riduzione della propagazione delle cricche dovuto al rinforzo, questo porta quasi a raddoppiare tenacità e resistenza della matrice.
- Compositi a matrice plastica: ultima tipologia di compositi, ma non ultima per importanza, è la più varia sia come caratteristiche che come utilizzi. La matrice è un polimero termoplastico o indurente, mentre come rinforzo sono utilizzate svariate tipologie di fibre (aramidiche, di vetro, di carbonio, di boro): il grande numero di combinazioni possibili fornisce una gran varietà di caratteristiche meccaniche e differenti costi di produzione permettendo a questi materiali di trovare innumerevoli applicazioni in molti campi. Il seguente paragrafo ne conterrà un esame più approfondito.

1.4. FRP (Fiber Reinforced Plastics)

I compositi utilizzati nel presente lavoro di tesi sono appunto le FRP o Fiber Reinforced Plastics, cioè quei polimeri termoplastici o termoindurenti rinforzati con fibre.

Le FRP hanno una estesa applicazione in quanto hanno un costo relativamente basso in relazione alle prestazioni, consentono una grande varietà di combinazioni matrice/rinforzo e soprattutto hanno un alto valore del rapporto tra resistenza meccanica e densità. Presentano generalmente rapporti rigidità/peso e resistenza/peso molto elevati grazie al rinforzo sotto forma di fibre di piccolo

diametro; si rileva infatti che minore è il diametro delle fibre, a parità di altri parametri, maggiore è la resistenza del composito risultante: questo perché riducendone il diametro si riduce la probabilità ed il numero dei difetti presenti al loro interno insorgenti durante il procedimento di produzione (caso analogo alla grana piccola o grande negli acciai). Inoltre riducendo il diametro delle fibre aumenta la superficie di interfaccia fibre/matrice consentendo un più distribuito ed efficace trasferimento dei carichi.

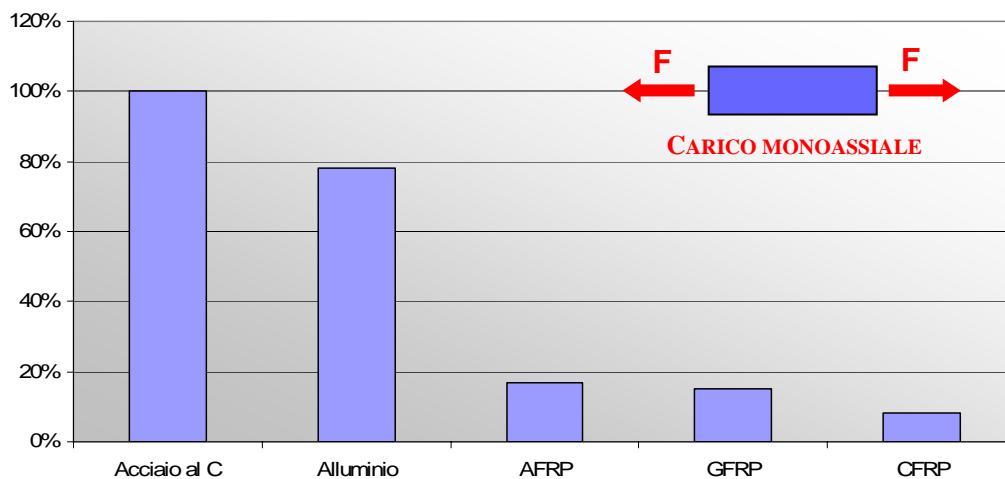


Fig. 1.2 – Confronto in peso tra i vari materiali necessari per resistere alla stessa sollecitazione monoassiale F

1.4.1. Tipi di matrici

I polimeri comunemente utilizzati come matrice sono i termoindurenti in quanto garantiscono migliori caratteristiche di resistenza meccanica e di rigidezza, maggior semplicità del processo produttivo ed una maggior resistenza alla temperatura e ad altri agenti atmosferici.

Le resine termoplastiche hanno un limitato impiego poiché le loro proprietà meccaniche decadono con l'aumentare della temperatura; sono per lo più utilizzati policarbonati, poliuretani, poliestere, polietilene e polipropilene. Tali polimeri garantiscono comunque una maggior coesione e maggior tenacità rispetto alle termoindurenti ed essendo rifondibili (le proprietà chimiche non degradano nel passaggio allo stato liquido) offrono importanti possibilità di riutilizzo e riciclo.

Influisce a favore delle resine termoindurenti anche il costo più contenuto e la facilità di fabbricazione : le più utilizzate sono le resine poliesteri, epossidiche e fenoliche. Le prime due per impieghi a temperatura ambiente, le altre per applicazioni a temperature più elevate (circa 370°).

- Resine epossidiche: conferiscono al composito una buona resistenza alla frattura avendo un legame fibra/matrice ottimale. La resistenza agli agenti atmosferici è tra le migliori ma la temperatura di esercizio è relativamente bassa (circa 180°C) limitandone l'utilizzo per applicazioni a temperatura ambiente.

- Resine poliestere: il legame fibra/matrice è piuttosto debole, ma offrono un'ottima resistenza agli agenti atmosferici ma temperatura di utilizzo ancor più limitata (circa 80°C).
- Resine viniliche: hanno caratteristiche comparabili a quelle poliestere ma con legame fibra/matrice più robusto.
- Resine fenoliche: hanno prestazioni simili alle resine epossidiche ma con limite della temperatura di utilizzo più elevato; necessitano però della applicazione di una notevole pressione durante il processo di formatura, in modo da limitare la loro spiccata tendenza a formare cavità.

	Poliestere	Epossidica
Resistenza a trazione, MPa	40 - 90	55 - 130
Modulo di elasticità a trazione, GPa	2.0 – 4.4	2.8 – 4.2
Carico di snervamento a flessione, MPa	60 – 160	125
Resistenza all'impatto, J/m	10.6 – 21.2	5.3 – 53
Densità, g/cm ³	1.10 – 1.46	1.2 – 1.3

Tabella 1.1 –alcune proprietà delle resine poliestere ed epossidiche da colata non rinforzate [1].

1.4.2. Tipi di fibre

Le tipologie di fibre utilizzate come rinforzo per le FRP sono: di vetro, aramidiche, di carbonio e di boro.

Le più diffuse sono le fibre di vetro grazie al loro maggior rapporto resistenza/costo, mentre dove sono necessarie maggiori resistenza e rigidità vengono preferite le fibre di carbonio o le aramidiche a scapito di un costo superiore. Costi ancora più elevati vanno sostenuti per materiali rinforzati con fibre di boro a causa del lento e laborioso processo di realizzazione: queste però hanno resistenza paragonabile a quelle in carbonio ma con rigidità elevatissima e stabilità alle alte temperature.

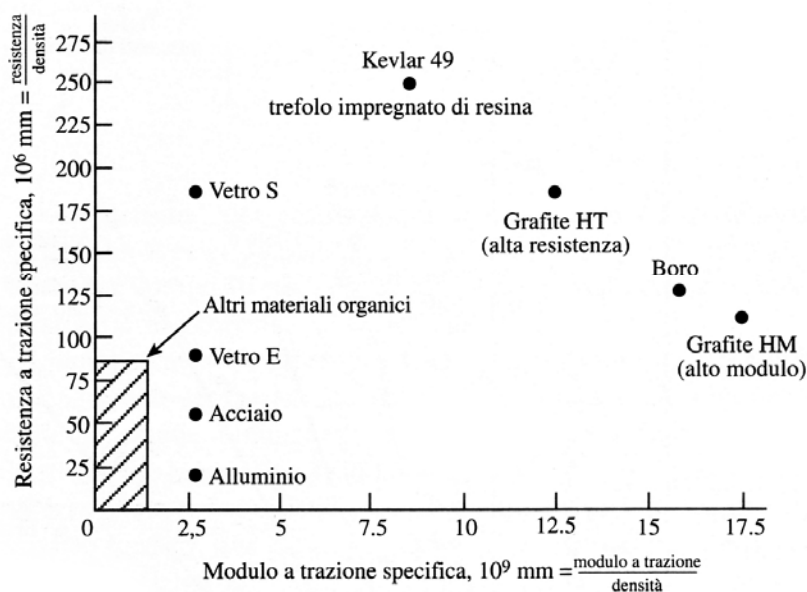


Fig. 1.3 – Resistenza a trazione specifica e modulo elastico specifico di vari tipi di fibre di rinforzo. (da [1]).

Facendo una breve panoramica le caratteristiche delle varie tipologie di fibre si possono così riassumere;

- Fibre di vetro: sebbene le caratteristiche meccaniche siano inferiori a quelle degli altri rinforzi, sono comunque sufficienti per molti impieghi, ed il loro costo contenuto fa sì che queste fibre siano molto diffuse. Hanno un discreto comportamento alle alte temperature, una bassa conducibilità termica, trasparenza (anche ai radar), sono economiche ed hanno una buona resistenza agli agenti chimici ed atmosferici. Il processo più comune per l'ottenimento delle fibre è l'estrusione di queste attraverso delle bussole calibratrici partendo dalla massa di vetro fusa all'interno di un forno; vengono successivamente raffreddate e cosparse di solvente che le proteggerà e creerà l'interfaccia con la matrice.
- Fibre di carbonio: hanno ottime caratteristiche meccaniche e soprattutto il miglior rapporto prestazioni/peso. Il loro costo è superiore a quello delle fibre di vetro ma inferiore a quello delle fibre di boro. Il loro comportamento a rottura è fragile. Il processo di fabbricazione consta di 3 fasi: inizialmente si ha la filatura di fibre polimeriche precursori (PAN o poliacrilonitrile la più diffusa ed economica) le quali vengono stabilizzate (200-220°C) e successivamente si ha la carbonizzazione tramite pirolisi (1000-1500°C, con l'aumento della temperatura in atmosfera inerte perdono O, H e N) ed infine, se è richiesto un ulteriore aumento della rigidità si effettua la grafitizzazione (1800°C, la formazione ed orientamento dei cristalli di grafite aumenta sia la rigidità che la fragilità della fibra).

- Fibre aramidiche (poliammidiche aromatiche): sono le uniche di natura organica, hanno una elevata resistenza a trazione nella direzione della loro lunghezza. Ne esistono di due tipi, il Kevlar 29 a bassa densità ed alta resistenza meccanica, usata per applicazioni balistiche ed il Kevlar 49 caratterizzato da bassa densità, alta resistenza meccanica e modulo elastico elevato che lo rendono idoneo come rinforzo per plastiche nei compositi per applicazioni aerospaziali, marine automobilistiche e nell'industria in generale. Ottima la resistenza agli urti del kevlar.
- Fibre di boro: hanno un'elevatissima rigidità e vengono utilizzate in applicazioni strutturali ma sono estremamente costose a causa del complesso e lento processo con cui vengono preparate; si realizzano infatti tramite deposizione di boro sotto forma di vapore su dei filamenti di tungsteno di 0.01mm, ripetendo il procedimento numerose volte.

1.5. Lavorazione delle FRP

Tralasciando i processi di formatura delle FRP per cui si rimanda a [1, 2] il seguente paragrafo tratta delle possibili lavorazioni che si possono realizzare dopo la loro formatura delle FRP durante la fase di finitura ed assemblaggio. Come detto in precedenza queste operazioni dovranno essere limitate il più possibile in quanto ognuna tende ad interrompere la continuità delle fibre e quindi a diminuire le caratteristiche di resistenza del manufatto.

La più comune lavorazione consiste nell'operazione di sbavatura, in genere tramite abrasivo mediante procedimento manuale, dei bordi del manufatto, atta a rimuovere gli eccessi di resina fuoriusciti dagli stampi o a rendere le superfici esterne il più regolari possibile. Anche se i manufatti in composito vengono progettati per limitare le operazioni successive alla formatura, spesso queste sono necessarie, per ottenere fori, superfici di accoppiamento, sedi, asole, ecc..

1.5.1. Problematiche della lavorazione delle FRP

Le lavorazioni meccaniche successive alla formatura, oltre ad interrompere la continuità delle fibre, presentano altri inconvenienti in prossimità della zona lavorata quali:

- delaminazione superficiale;
- delaminazione interna
- distacco delle fibre;
- danneggiamento termico della matrice
- scarsa finitura superficiale
- scarsa tolleranza dimensionale.

La delaminazione "superficiale" interessa gli strati esterni, quella "interna" avviene all'interno dello spessore del laminato, sono fenomeni legati alla struttura discontinua dei compositi e sono dovuti da

due differenti cause. La prima è causata da un'azione meccanica e si può verificare in quelle lavorazioni dove si ha l'applicazione di forze ortogonali alla direzione degli strati laminati: si manifestano queste condizioni in foratura, tornitura, taglio con segatrice o waterjet, ecc.. La seconda è invece generata da un'azione termica, conseguente alla differente conducibilità termica di rinforzo e matrice, che tende a separare gli strati interni.

Il distacco delle fibre è dovuto alla ridotta coesione tra fibra e matrice, mentre il danneggiamento termico riguarda prevalentemente la matrice che ha temperature di degradazione limitate (tipicamente poche centinaia di gradi, mentre il rinforzo ha generalmente temperature di degradazione nettamente superiori). Il danno termico è inoltre facilitato dalla bassa conducibilità termica della matrice che tende a limitare la zona termicamente alterata provocando un veloce incremento localizzato della temperatura.

La natura discontinua delle FRP è causa anche della scarsa finitura superficiale che non può essere paragonabile a quella raggiungibile con i metalli; vi è inoltre la possibilità di avere delle fibre affioranti sulle superfici lavorate causando un ulteriore incremento dei valori di rugosità.

Tolleranze dimensionali e geometriche non sono elevate a causa delle tensioni residue, generatesi durante la formatura ed il successivo raffreddamento, che liberate dall'asportazione di una porzione di materiale potrebbero deformarlo; anche la differente dilatazione termica di matrice ed utensile può portare a quote nominali inferiori a quelle richieste.

Inoltre l'elevata capacità abrasiva delle fibre causa una rapida usura degli utensili limitando la scelta dei materiali dei taglienti. Per diminuire l'usura, attraverso una riduzione della temperatura nella zona di taglio, non è possibile utilizzare fluidi refrigeranti o lubrificanti vista l'elevata capacità di assorbimento dei compositi. La produzione di polveri fini, difficilmente abbattibili se non per aspirazione diretta risulta dannosa sia per gli operatori che per la macchina.

Per ovviare o quantomeno limitare questi danneggiamenti, per soddisfare le richieste precisioni sia dimensionali che superficiali è indispensabile utilizzare tecniche appositamente studiate ed adattate alla lavorazione dei materiali compositi. Queste devono infatti tenere conto del particolare comportamento delle FRP sottoposti alle sollecitazioni generate durante il taglio in funzione delle loro proprietà:

- resistenza meccanica delle fibre;
- comportamento al taglio
- adesione tra fibra e matrice
- conducibilità termica ed elettrica
- capacità di resistere alle alte temperature

1.5.2. Lavorazione dei compositi tramite processi tradizionali e non convenzionali

Oltre agli inconvenienti precedentemente riportati e comuni a quasi tutte le lavorazioni se ne presentano altri specifici di ciascuna tipologia di processo.

1.5.2.1. Fresatura

L'operazione di fresatura è necessaria nelle operazioni di contornatura, taglio, spianatura di superfici di accoppiamento e per la sbavatura. I materiali usati per la costruzione dei taglienti possono essere sia i carburi che i diamanti policristallini (PCD); dal punto di vista della durata, superiore fino a 100 volte, sono preferibili questi ultimi anche se il materiale tende ad impastarsi sull'utensile riducendo le proprietà di taglio e favorendo il surriscaldamento localizzato.

Utilizzando frese a taglio periferico, la modalità di lavorazione che garantisce una miglior finitura superficiale risulta essere la lavorazione in opposizione (rotazione della fresa opposta all'avanzamento del pezzo). Per limitare la delaminazione è generalmente consigliato l'uso di frese a più taglienti così da limitare la pressione specifica di taglio, inoltre, nel caso della spianatura, si può evitare la rottura del materiale in corrispondenza del lembo terminale eseguendo la lavorazione in due passate con direzione opposta anziché in una unica.

Nella lavorazione delle plastiche rinforzate con fibra aramidica, di natura organica e a comportamento duttile, è necessario ricorrere ad utensili con particolari geometrie per ovviare allo sfilacciamento della fibra e conseguente affioramento della stessa dalla superficie lavorata. Si realizzano perciò geometrie apposite che premono entrambe le superfici del lembo lavorato verso l'interno del laminato stesso: frese bi-elicoidali, frese ad eliche contrapposte, frese con denti a V.

1.5.2.2. Taglio con segatrice

Le segatrici con lame circolari od a nastro vengono utilizzate per il taglio grossolano lungo contorni semplici; si utilizzano macchine convenzionali o apparecchiature portatili.

Anche in questo caso mentre per il taglio di GFRP e CFRP sono utilizzati utensili con lame diamantate o acciaio rapido con carburi e con geometrie convenzionali, per il taglio delle AFRP, per i soliti motivi prima menzionati, si adottano particolari geometrie atte a limitare lo sfilacciamento delle fibre.

Come principali inconvenienti si riscontra: una notevole produzione di calore e polveri, delaminazione e sfilacciamento dei lembi, possibilità di vibrazioni specialmente durante la lavorazione di piccoli spessori dove risulta perciò necessario un accurato bloccaggio del pezzo. Il processo è inoltre difficilmente automatizzabile.

1.5.2.3. Taglio waterjet

L'asportazione del materiale è ottenuta grazie alla pressione di un getto d'acqua ad elevata pressione che fuoriesce a grande velocità da un ugello opportunamente conformato. La capacità di

taglio viene incrementata mescolando al flusso d'acqua degli opportuni agenti abrasivi, che sono necessari per il taglio di spessori elevati o materiali particolarmente resistenti.

In questo tipo di lavorazione non tradizionale, nella quale non si ha un contatto utensile/pezzo, si ravvisano i seguenti vantaggi:

- facilità di automazione;
- possibilità di operare su una notevole varietà di materiali compositi, sia prima che dopo la polimerizzazione;
- assenza di stress termico;
- ridotti sforzi applicati sul pezzo (solo quelli causati dall'avanzamento del getto, molto circoscritto)
- assenza di polveri

Per contro si rilevano alcuni svantaggi:

- presenza di delaminazione
- possibile deviazione del getto a causa della natura disomogenea dei compositi, con erosione accentuata della matrice e possibilità di fibre affioranti;
- craterizzazione del taglio in ingresso;
- prestazioni ridotte, sia come rateo di asportazione che come qualità del taglio, per elevati spessori;
- notevole investimento iniziale;

In generale è possibile concludere che nel taglio di piccoli spessori è preferibile il waterjet, che consente velocità di avanzamento elevate e buone finiture, mentre per grossi spessori, dove il waterjet non assicura più buone finiture superficiali, è preferibile la fresatura.

1.5.2.4. Taglio laser

Il processo di taglio laser si basa sulla fusione e vaporizzazione del materiale da lavorare per effetto dell'energia trasportata dal fascio di luce coerente generata per emissione LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Tramite un sistema di focalizzazione questo fascio viene concentrato in piccolissimi spot raggiungendo un'elevatissima potenza specifica in grado di fondere e vaporizzare qualsiasi materiale.

Nessuna forza dinamica o statica agisce sul pezzo eccettuata la pressione esercitata dal gas di supporto al fascio laser; non è perciò presente l'inconveniente della delaminazione. Il problema principale è invece rappresentato dalle elevate temperature che si raggiungono nella zona di taglio e che possono portare a danneggiamenti termici alla struttura del materiale; ciò può essere limitato eseguendo un'adeguata calibratura del raggio, della velocità di avanzamento e della pressione del gas di supporto.

I migliori risultati di taglio laser si ottengono con plastiche rinforzate con fibre aramidiche, dove la fibra di natura organica ha una conducibilità termica paragonabile a quella della matrice plastica e limita l'incremento di temperatura alla sola zona di lavoro. Nel caso di CFRP, invece, si hanno danni termici assai più estesi a causa dell'elevata conducibilità termica del rinforzo che innalza la temperatura anche lontano dalla zona di lavorazione.

Confrontando i metodi di taglio descritti in precedenza con quello laser, si nota come sia da preferire quest'ultimo nel caso di spessori sottili ed in particolare nel taglio delle fibre aramidiche: pesano a sfavore del taglio laser l'ingente investimento iniziale e le notevoli spese relative all'energia necessaria (il rendimento del laser è molto ridotto).

1.5.2.5. Foratura, lamatura, svasatura

La foratura è sicuramente il processo più comune nella lavorazione finale delle plastiche rinforzate con fibre. L'equipaggiamento varia in funzione delle dimensioni del pezzo da lavorare e dell'entità della produzione e spazia dai trapani portatili per le lavorazioni in loco fino a macchine a controllo numerico.

Lamatura e svasatura sia che avvengano contemporaneamente o successivamente alla foratura, sono molto simili come processo e presentano problematiche analoghe a quelle riscontrabili in foratura.

Tra quelli elencati in precedenza i gli inconvenienti più comuni della foratura sono:

- delaminazione superficiale;
- scarsa durata dell'utensile dovuta al potere altamente abrasivo del rinforzo;
- danneggiamento termico della matrice a causa dell'elevata temperatura di taglio.

La delaminazione può presentarsi sia in ingresso che in uscita: in entrambi i casi è dovuta al superamento della forza di coesione tra gli strati del laminato.

Nel primo caso (*peel up*) il superamento del valore critico di coesione interlaminare è dovuto alla presenza dei solchi elicoidali delle punte i quali tendono a sollevare i primi strati del composito.

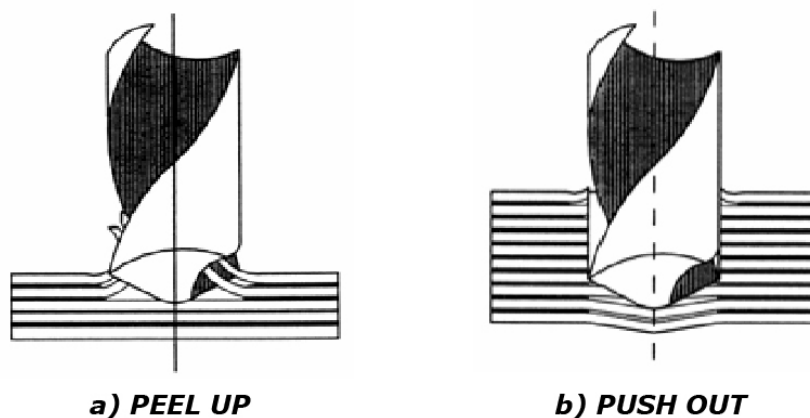


Fig. 1.4 – Delaminazione in entrata a) e in uscita b)

Nel secondo caso (*push out*), dove si ha un danneggiamento più ampio, il superamento di tale limite si ha a causa delle forze assiali sviluppate durante l'avanzamento dell'utensile. Durante la lavorazione la parte di laminato che si trova nella zona sottostante l'utensile è sollecitata a compressione e flessione; man mano che la punta avanza lo spessore di materiale non ancora tagliato diminuisce, riducendo la resistenza dello stesso a sopportare la spinta impressa dall'avanzamento dell'utensile. Il fenomeno ha inizio quando il carico supera la resistenza interlaminare del composito staccando le fibre dalla matrice ancor prima che la punta abbia completato la foratura. Si generano ampie fratture che si propagano parallelamente alla direzione delle fibre finché, con l'avanzare della punta, viene raggiunto il carico critico della parte di composito separato dalla matrice: si ha di conseguenza la sua rottura e lo sfondamento della superficie di uscita dell'utensile.

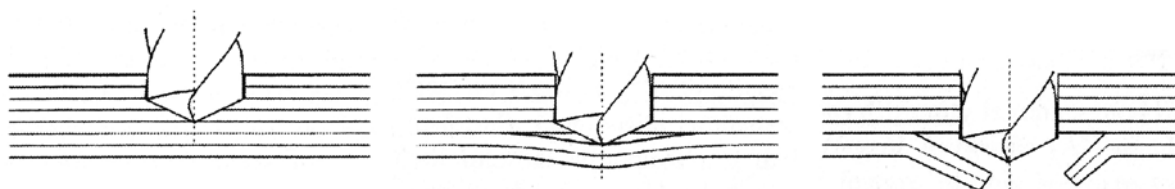


Fig. 1.5– Formazione della delaminazione in uscita

I fattori che influenzano tali fenomeni sono soprattutto i parametri di taglio (V_t e a) e la geometria dell'utensile. I parametri di taglio devono perciò essere attentamente valutati, vista la notevole influenza (diretta o indiretta) che hanno sia avanzamento che velocità di taglio. Essendo la forza assiale direttamente influenzata dall'usura del tagliente, si preferiscono utensili in carburi o in PCD che mantengono la geometria originaria per un numero maggiore di forature rispetto ai tradizionali in HSS. Per la lavorazione di AFRP, vista la natura duttile del materiale, sono necessarie punte con geometria tale da precaricare a trazione le singole fibre e successivamente tagliarle. Per GFRP e CFRP sono invece sufficienti convenzionali punte ad elica (in HSS, carburi o PCD) anche se sono state proposte numerose geometrie alternative atte a migliorare la qualità dei fori.

<i>PROCESSO</i>	<i>PARAMETRI</i>	<i>VANTAGGI</i>	<i>SVANTAGGI</i>
Tornitura	velocità di taglio, avanzamento, profondità di passata, refrigerazione, geometria utensile, materiale utensile	Processo classico, equipaggiamento tradizionale	Rapida usura utensili, tolleranze ampie, scarsa finitura, polveri,
Fresatura		Processo classico, equipaggiamento tradizionale	Rapida usura utensili, tolleranze ampie, scarsa finitura, polveri, utensili speciali
Foratura, lamatura, svasatura		Processo classico, equipaggiamento tradizionale, portabilità	Utensili con geometrie speciali, delaminazione, tolleranze ampie, scarse finiture, formazione polveri
Molatura			Bassa produttività, formazione polveri
Taglio con segatrice		Processo classico, equipaggiamento tradizionale	Operazione difficilmente automatizzabile, taglio grossolano frequente delaminazione, contorni semplici, formazione polveri
Taglio con waterjet	Pressione pompa, distanza ugello/superficie (o di stand off), avanzamento, diametro e forma ugello	Facile automazione, tagli complessi, assenza usura, assenza polveri, assenza danni termici, facile staffaggio	Delaminazione, erosione superficiale, piccoli spessori
Taglio con laser	Sorgente emissione, potenza pascio, gas d'apporto, avanzamento, distanza focale	Facile automazione, tagli complessi, assenza usura, assenza polveri	Alto costo, danneggiamento termico, piccoli spessori, formazione fumi

Tabella 1.1 –Riepilogo delle lavorazioni possibili successive alla formatura delle FRP, parametri che le influenzano, loro vantaggi e svantaggi

Nei prossimi capitoli di questo lavoro vengono descritte le prove di foratura eseguite su provini di materiale composito a matrice epossidica rinforzata con fibra di carbonio.

2. LO STATO DELL'ARTE SULLA FORATURA DEI FRP

2.1. Premessa

Come già accennato in precedenza le lavorazioni meccaniche sulle FRP (Fiber Reinforced Plastics), a seguito della formatura devono essere limitate il più possibile in quanto interrompono la continuità delle fibre e quindi ne compromettono la resistenza: nonostante questa premessa, si fa largo uso di operazioni di foratura quando non si riesca ad ottenere un particolare mediante il solo processo di formatura. La realizzazione dei fori ha lo scopo di creare alloggi per giunzioni come bullonature, chiodature, ecc..

Lo stato dell'arte sul processo di foratura di FRP è assai vasto e comprende oltre all'analisi dell'influenza dei parametri di taglio, anche diverse modalità di controllo in moda da ottimizzare la produzione e l'utilizzazione degli utensili.

2.2. Influenza dei vari parametri sulla foratura delle FRP

La foratura dei materiali compositi è un fenomeno notevolmente complesso ed è regolato da numerosi fattori, primi tra tutti parametri di taglio (avanzamento e velocità di taglio), caratteristiche del materiale e dell'utensile utilizzato.

In letteratura numerosi contributi analizzano il processo di foratura: nella maggior parte di questi i parametri variabili sono il materiale lavorato (GFRP e principalmente CFRP) il materiale dell'utensile (HSS, carburi, PCD), la geometria dell'utensile, la velocità di taglio (mm/1') e l'avanzamento (mm/g). Per il controllo del processo vengono utilizzate misure della forza di penetrazione e della coppia di taglio, della delaminazione e dell'usura utensile.

Purtroppo, vista la grande varietà dei materiali compositi, non sempre è possibile generalizzare certe indicazioni per qualsiasi tipologia e condizione di lavorazione.

2.2.1. Velocità di taglio ed avanzamento

Dalle esperienze in letteratura si può osservare come l'avanzamento sia il parametro che maggiormente influenza la forza assiale mentre l'effetto della velocità sembra essere meno marcato. L'aumento della velocità pur non influenzando direttamente sull'entità della spinta assiale determina invece un aumento dell'usura dell'utensile ed una riduzione della vita dello stesso.

La coppia, come la forza di penetrazione, aumenta con l'aumentare dell'avanzamento.

La rugosità della superficie interna del foro risulta infine diminuire al crescere della velocità di taglio ed aumentare con l'incremento dell'avanzamento.

2.2.2. Tipologia utensile: materiale e geometria

Le particolari caratteristiche strutturali, termiche, abrasive dei FRP fanno sì che nella foratura sia posta particolare attenzione alla scelta della geometria e del materiale dell'utensile: tale selezione è vincolata soprattutto dalla tipologia della fibra da tagliare piuttosto che della matrice.

Fatta questa considerazione la punta elicoidale a due taglienti in acciaio super rapido HSS, normalmente utilizzata per la foratura dei metalli, è tuttora quella più usata nella foratura dei materiali compositi, soprattutto per il suo basso costo. Molti sono però gli inconvenienti dovuti al suo utilizzo su questi materiali: rapida usura e forte delaminazione legata alla spinta assiale (crescente all'aumentare dell'usura), sono i principali. Per ovviare alla rapida usura le punte vengono costruite con materiali maggiormente resistenti all'usura quali carburi o diamante policristallino (PCD) che ha una durata fino a 100 volte superiore ai primi. In questo caso il costo degli utensili è notevolmente superiore ma può essere compensato da ampie produzioni.

Altro limite delle punte elicoidali è la presenza del nocciolo che, con angoli di spoglia fortemente negativi, lavora il materiale per estrusione deformandolo plasticamente verso la periferia piuttosto che per asportazione di truciolo: è infatti dovuta al nocciolo larga parte (fino anche all'80%) della spinta assiale esercitata dall'utensile durante la foratura. A riprova di questa considerazione sono state eseguite prove di foratura con preforo di diametro superiore a quello del nocciolo osservando una notevole riduzione dello sforzo assiale.

Inoltre questa tipologia di punta, a causa del basso numero di taglienti non riesce a distribuire efficacemente la spinta mantenendo elevata la pressione specifica di ciascun tagliente favorendo il fenomeno della delaminazione.

2.2.2.1. Geometrie utensile alternative

Per ovviare ai limiti della geometria delle punte elicoidali sono state realizzate geometrie particolari che tendono soprattutto ad eliminare il nocciolo ed a distribuire la spinta assiale su più taglienti possibile riducendo così l'insorgere della delaminazione. Tra queste soluzioni si trovano:

- *Punte con tagliente a "C"*: genera una minore pressione specifica di taglio (proporzionale all'avanzamento ed alla coppia). Sono riscontrate, a parità di altre condizioni forze assiali più che dimezzate rispetto alla foratura con punta tradizionale ad elica.

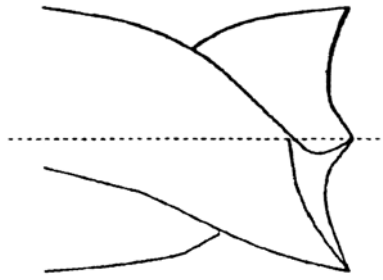


Fig. 2.1 – Punta con tagliente sagomato a “C”

- *Punte core drill e saw drill*: sono 2 tipologie diverse di punte (fig. 2.2) ma presentano entrambe un foro nella zona centrale. Grazie a questo è garantita una migliore distribuzione della forza assiale rispetto alle punte elicoidali: alcuni studi hanno evidenziato che con questo genere di geometria si ottiene una delaminazione più contenuta ed una migliore qualità del foro.

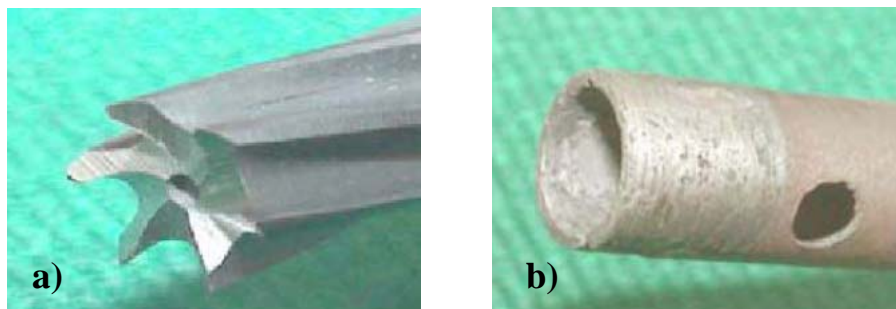


Fig. 2.2– Punta core drill (a) e saw drill (b)

- *Punte one shot drill*: sono utensili dalla particolare geometria che permette di eseguire sia la foratura che l'alesatura/finitura del foro in una sola passata con un solo utensile (da qui il nome “one shot drill”). L'utensile (fig. 2.3) dalla geometria complessa, dotato di quattro taglienti rettilinei con angoli variabili, permette oltre 100 fori prima di necessitare la riaffilatura.



Fig. 2.3– Punta one shot drill

- *Punte a lancia*: utensili dalla geometria particolare che permettono di realizzare contemporaneamente foratura e svasatura. Si riescono a realizzare alcune decine di fori prima di apprezzare un decadimento della qualità della lavorazione.

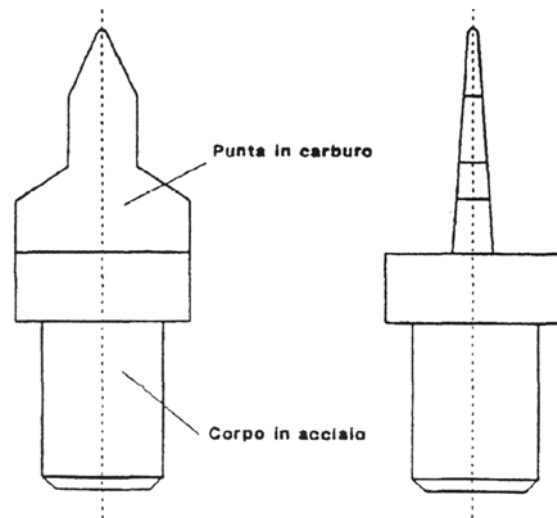


Fig. 2.4– Punta a lancia

2.2.2.2. Altri accorgimenti

Per ridurre la delaminazione oltre ai sopracitati accorgimenti si possono, dove possibile, preparare delle maschere di foratura da piazzare in corrispondenza della superficie di uscita della punta. Tali maschere possono essere fissate direttamente sulla tavola portapezzo oppure, in caso di trapani portatili, inglobate in morse che consentono sia di bloccare il pezzo in lavorazione che di evitare la delaminazione all'uscita dell'utensile. In entrambi i casi la superficie posteriore del pezzo da forare deve essere facilmente accessibile. In alternativa, per proteggere la superficie di uscita la si può rivestire con tessuti protettivi oppure con sottili laminati di alluminio o titanio: quest'ultima soluzione, dove il substrato metallico si comporta da elemento protettivo è molto comune in campo aerospaziale.

Le suddette considerazioni sono generalmente valide per qualsiasi tipo di plastica rinforzata con fibre. Oltre a queste ciascun tipo di matrice o di fibra può comportare ulteriori accorgimenti a causa di comportamenti non riscontrabili nelle altre tipologie. Si prenda ad esempio il comportamento duttile della fibra aramidica, l'unica di natura organica, che obbliga ad utilizzare punte con tagliente a "C" per non incorrere in un eccessivo sfilacciamento delle fibre durante il taglio.

2.3. Il controllo del processo di foratura su FRP

Ulteriori miglioramenti nell'ottimizzazione del processo e nella qualità dei fori vengono fornite dalla possibilità di monitorare e controllare i parametri del processo. Per chiarire le opportunità basti ricordare che l'avanzamento è un parametro fondamentale processo di formazione della delaminazione e che, al suo variare, si può da una parte massimizzare la produttività (aumentandolo nella parte iniziale) e minimizzare la delaminazione (diminuendolo in prossimità dell'uscita).

Si trova in letteratura un notevole numero di esperienze in merito, ma questo studio si limiterà ad analizzare le applicazioni che sfruttano reti neurali e logica fuzzy che presentano interessanti prospettive e spunti per lo studio di fenomeni difficilmente modellabili quali la lavorazione dei compositi.

2.3.1. Reti neurali (Artificial Neural Network, ANN)

Le reti neurali artificiali (*ANN*) sono nate per riprodurre le attività tipiche del cervello umano come la percezione di immagini, il riconoscimento di forme, la comprensione del linguaggio, il coordinamento senso-motorico, ecc.. Con tale scopo sono state studiate le caratteristiche del cervello umano per riprodurre artificialmente una struttura simile.

Il cervello umano è un calcolatore complesso, non lineare e parallelo; è costituito da elementi di elaborazione molto semplici (i neuroni) ma è in grado di eseguire computazioni molto complesse come il riconoscimento, il controllo del movimento o la percezione molto più velocemente del più veloce calcolatore attualmente disponibile. Questa particolare struttura parallela rende il cervello *fault tolerant*, cioè se un neurone od una delle sue connessioni viene danneggiata il cervello continua a funzionare anche se con prestazioni lievemente degradate. È inoltre in grado di imparare modificando le connessioni tra i neuroni in base all'esperienza acquisita.

2.3.1.1. Principio di funzionamento

Per riprodurre artificialmente il cervello umano occorre realizzare una rete di elementi molto semplici con una struttura distribuita e massicciamente parallela capace di apprendere e quindi di generalizzare: dovrà cioè riuscire a produrre delle uscite in corrispondenza ad ingressi non incontrati durante l'addestramento.

L'elemento base della rete neurale artificiale è il *neurone artificiale*: questo ha numerosi ingressi ed una sola uscita. Ad ogni ingresso è associato un peso che determina la conducibilità del canale d'ingresso: l'attivazione del neurone è una funzione della somma pesata degli ingressi.

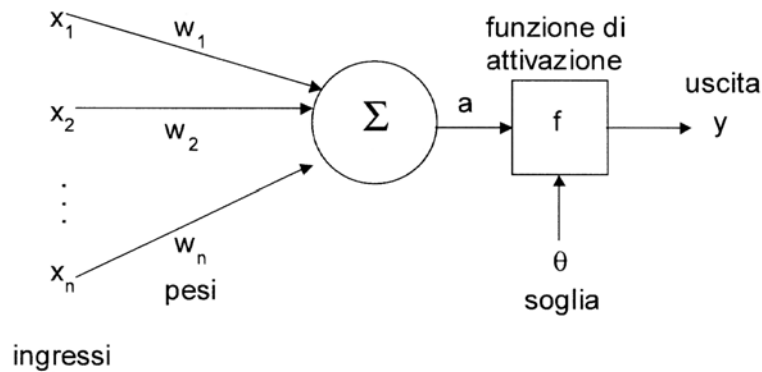


Fig. 2.5– Modello di neurone

L'uscita, cioè il segnale con cui il neurone trasmette la sua attività all'esterno, è calcolata applicando la *funzione di attivazione* (a soglia, lineare, lineare a tratti, sigmoide) alla somma pesata degli ingressi. Nel modello di neurone rappresentato nella figura precedente è presente la *soglia* (*threshold*) che limita l'attivazione del neurone per valori complessivi degli ingressi inferiori alla soglia stessa.

I neuroni artificiali collegati tra loro formano la rete neurale che può avere architetture differenti: le *reti completamente connesse* (fig. 2.6-a) e le *reti stratificate* (fig. 2.6-b) sono le più comuni. Nella prima ciascun neurone è connesso con tutti gli altri: tali connessioni sono rappresentate in una matrice quadrata, di dimensione pari al numero dei neuroni, i cui elementi rappresentano i pesi delle singole connessioni. Nelle reti stratificate si identificano degli strati di neuroni tali che ogni neurone di ciascuno strato è collegato con quelli dello strato successivo; non esistono connessioni tra neuroni dello stesso strato o tra neuroni di strati non adiacenti. Le connessioni in una rete stratificata sono rappresentate da tante matrici quanti sono le coppie di strati adiacenti; inoltre, dato che i segnali viaggiano dallo strato d'ingresso verso quello di uscita, si parla di rete *feedforward*.

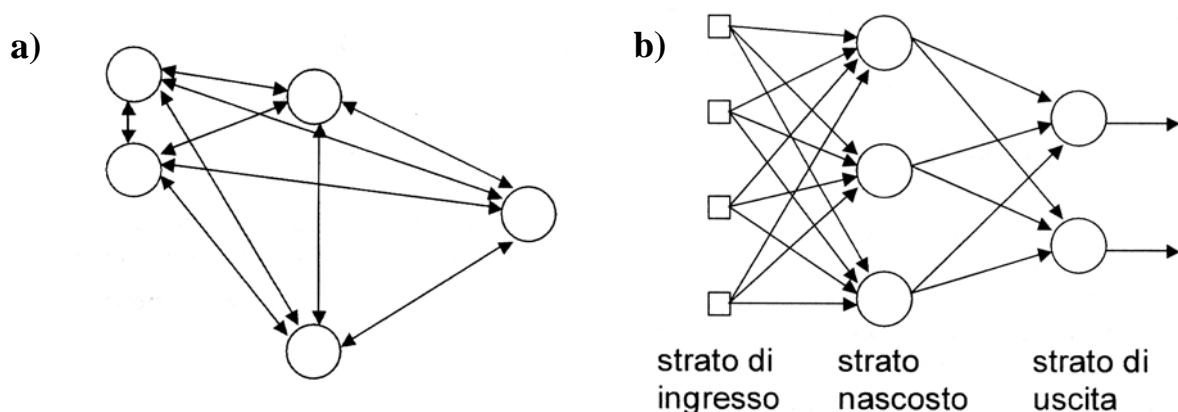


Fig. 2.6– Rete completamente connessa a) e rete stratificata b)

Il numero di neuroni e di strati è funzione dello specifico problema che la rete deve risolvere.

Il buon funzionamento della rete neurale dipende sia dall'architettura della rete (numero di strati e numero di neuroni per strato) sia dalla funzione di attivazione dei neuroni che dai pesi. Una volta definita l'architettura della rete e le funzioni di attivazione verrà eseguita la fase di apprendimento (*training*) che consiste nell'aggiustare i pesi fino a che la rete produca le risposte desiderate.

Uno dei modi più utilizzati per permettere ad una rete di imparare è l'*apprendimento supervisionato* che prevede di presentare alla rete una serie di esempi (*training set*) ciascuno con la corrispondente uscita desiderata. I pesi vengono inizializzati casualmente e successivamente si iniziano a presentare gli esempi calcolandone per ciascuno l'errore commesso dalla rete. L'errore, cioè la differenza tra l'uscita desiderata e quella risultante dalla rete, viene utilizzato per correggere i pesi. Il processo viene ripetuto ciclicamente ripresentando alla rete lo stesso set di esempi finché l'errore non scende sotto la soglia prestabilita.

La regola più utilizzata per aggiustare i pesi delle connessioni è la *delta rule*: detta regola modifica in maniera proporzionale all'errore soltanto i pesi delle connessioni che hanno contribuito all'errore. Per determinare la velocità di apprendimento si può variare il *learning rate*, coefficiente moltiplicativo della variazione dei pesi per ciascuna iterazione. Nelle reti multistrato per aggiornare i pesi anche degli strati intermedi si utilizza l'algoritmo di *backpropagation* che prevede di calcolare l'errore commesso dai neuroni dell'ultimo strato nascosto propagando all'indietro l'errore calcolato sui neuroni di uscita collegati a tale neurone. Lo stesso procedimento è poi ripetuto per i neuroni del penultimo strato nascosto e così via fino a completare tutta la rete.

Una volta terminato l'apprendimento ci sarà una fase di test per valutare la capacità di apprendimento della rete, alla quale verranno sottoposti alcuni esempi (*validation set*) non analizzati durante la precedente fase di training.

2.3.1.2. Applicazioni delle ANN nella foratura dei FRP

Di seguito si riportano alcune applicazioni di reti neurali nel campo del controllo della produzione.

- *Stima della delaminazione nella foratura di GFRP* [11]: viene utilizzata una rete neurale per la predizione della delaminazione nella foratura, con punte in acciaio rapido HSS, di plastica rinforzata con fibre di vetro monitorando i parametri di taglio. Sono realizzate due tipologie di reti neurali, una analogica che stima il valore medio di danneggiamento ed una digitale che classifica il danneggiamento previsto in 4 classi. Dalla campagna esplorativa è stato appurato che il danneggiamento aumenta con l'aumentare della forza media di avanzamento e dell'usura: perciò, mentre la velocità di taglio non influenza il danneggiamento, l'avanzamento è il parametro critico per la determinazione del danneggiamento sia in ingresso (PUD) che in uscita (POD). Realizzata la struttura, la rete viene sottoposta al training ed alla successiva validazione.

I risultati sono discreti per entrambe le tipologie presentate, anche se nel caso della rete digitale questa propone delle risposte non corrette nelle zone di confine tra le classi.

- *Riduzione della delaminazione durante la foratura di plastica epossidica rinforzata con fibra di grafite mediante il controllo della forza di penetrazione* [12]. In questa esperienza vengono realizzate due reti neurali che operano contemporaneamente: la prima (*neural identifier*) serve per modellare il processo di foratura, la seconda (*neural controller*) per definire i parametri di taglio da retroazionare alla macchina utensile. I valori di riferimento vengono calcolati mediante la teoria della frattura lineare elastica. Realizzati training e validazione la rete riesce a mantenere l'errore sulla F_t del 5% rispetto al valore desiderato e confrontando i fori realizzati utilizzando l'avanzamento controllato con quelli ad avanzamento costante si apprezza un notevole miglioramento della qualità. Si denota inoltre una buona robustezza del controllore al variare dei parametri di taglio
- *Implementazione del processo decisionale nelle operazioni di molatura* [13]: per effettuare la scelta dei parametri ottimali durante il processo di molatura viene costruita una rete neurale multistrato composta da due tipologie. Una rete *feedforward* (*FF ANN*) che accetta in ingresso la rugosità desiderata e fornisce in uscita le possibili combinazioni di parametri di taglio candidate, ed in cascata una *Brain-state-in-a-box* (*BSB ANN*) che vaglia le possibili candidate per ottenere la rugosità richiesta in ingresso per poi scegliere la più opportuna in base all'esperienza acquisita. Si realizza così un processo molto simile a quello realmente effettuato da un operatore in base alla propria esperienza e memoria associativa. La rete, così strutturata, dimostra una notevole flessibilità e può essere applicata ad altri processi di lavorazione cambiando solo il training set.

2.3.2. Logica fuzzy

Tradotto letteralmente dall'inglese “fuzzy” significa “indistinto”, “sfumato” o meglio ancora “non nettamente definito”. Alla base della logica fuzzy, a differenza della logica classica, vi è il tentativo di modellare il modo di ragionare tipicamente umano che porta a prendere decisioni anche in situazioni dominate dall'incertezza e dall'imprecisione. Quella che sembra essere la nostra capacità di fornire risposte basandoci su una conoscenza incompleta, non del tutto affidabile o comunque non sempre esprimibile in termini precisi è ciò che si cerca di implementare mediante la logica fuzzy.

La logica fuzzy, dunque, appare la risposta adeguata per la risoluzione di problemi intrinsecamente non ben definiti e per i quali risulta difficile, od addirittura impossibile, costruire un modello matematico esatto.

2.3.2.1. Cenni ai numeri fuzzy ed alla logica fuzzy

La logica fuzzy si contrappone alla logica classica, anzi ne è un'estensione: mentre nella logica classica o binaria una affermazione può essere soltanto vera (valore 1) o falsa (valore 0) nella logica fuzzy ogni affermazione può assumere anche valori intermedi (nell'intervallo $[0, 1]$). Si può cioè attribuire ad ogni proposizione un grado di verità compreso tra 0 ed 1.

Per capire i fondamenti della logica fuzzy si faccia riferimento ad un banale esempio. Nella logica classica una persona è considerata adulta, ovvero fa parte del set “adulti” al 100% , quando supera il diciottesimo anno d'età, altrimenti rientra nel set “non adulti” al 100%; si parla di *crisp sets* nettamente definiti. In logica fuzzy, invece, il *fuzzy set* ha una sfumatura sul confine adulti/non adulti. Una persona che ha un'età di 18 anni appartiene contemporaneamente al fuzzy set “adulti” per il 50% ed al fuzzy set “non adulti” per l'altro 50% (fig. 2.6).

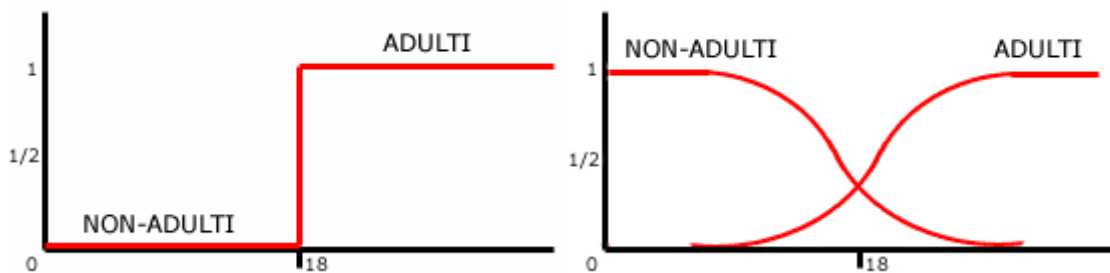


Fig. 2.6 – Rappresentazione grafica di a) Crisp set e b) fuzzy set riferito all'età delle persone

Quando si hanno informazioni insufficienti è perciò possibile trasformare le vaghe nozioni disponibili in fuzzy set tracciando le curve di appartenenza agli stessi: non è altresì possibile rappresentare le vaghe nozioni con insiemi crisp.

La curva che descrive il grado di appartenenza di un insieme fuzzy rappresenta il grado di verità (indicato con μ) che possiede ciascun elemento dell'universo considerato: tale curva è chiamata *membership function*. Maggiori saranno le informazioni, meglio definite risulteranno le curve di appartenenza e migliore sarà la rispondenza alla realtà.

Tralasciando gli aspetti più strettamente matematici, per i quali si rimanda a [8, 9, 10], si introduce il concetto di inferenza fuzzy. Con questi termini si vuole indicare quel metodo di ragionare tipico umano che da una conoscenza di base, appreso un determinato fatto, attraverso regole linguistiche conduce ad una conclusione. Anche in questo caso meglio si capisce il concetto tramite un semplice esempio: la regolazione della temperatura dell'acqua.

Conoscenza: se l'acqua è molto calda aggiungi molta acqua fredda;

fatto: l'acqua è abbastanza calda → conclusione: aggiungi un po' di acqua fredda

Come si nota dall'esempio l'inferenza fuzzy non è altro che il ragionamento di tutti i giorni, da cui anche il nome di "inferenza quotidiana".

È perciò possibile estrapolare da una più o meno ampia conoscenza di base numerose regole linguistiche in grado di rappresentare il fenomeno studiato. Queste regole, sempre molto semplici, hanno tutte la forma generale IF (premessa) \rightarrow THEN (conseguenza) e sono riportate in una tabella riassuntiva. La premessa può avere una struttura anche più articolata rispetto a quella semplice riportata nel precedente esempio coinvolgendo gli operatori logici AND, OR e NOT, mentre la conseguenza assegna un valore fuzzy ad uno o più elementi dell'insieme delle variabili di uscita. In generale un controllo complicato si può considerare come un aggregato formato da più parti semplici ciascuna delle quali è indipendente dalle altre. Il controllo di tipo fuzzy si basa sostanzialmente su questa idea di elaborazione parallela.

2.3.2.2. *Un controllore fuzzy*

Fatte queste premesse non dovrebbe essere complicato capire il funzionamento dei controllori a logica fuzzy. Le operazioni eseguite da un controllore fuzzy si possono dividere in sintesi in tre gruppi principali: la traduzione degli ingressi in numeri fuzzy mediante membership function, il processo inferenziale formato da un insieme di regole suddivise in condizioni (blocco antecedente) e conclusioni (blocco conseguente) seguite da un'operazione di somma logica, ed infine la defuzzificazione dell'uscita che converte i risultati del processo inferenziale in un valore univoco.

Si riporta di seguito quali sono i passi principali di un controllore fuzzy:

- Definizione delle variabili di controllo: specificare gli ingressi e le uscite. Ciascuna di queste viene rappresentata da insiemi fuzzy e per ciascuna di queste si deve determinare l'universo di definizione e le funzioni di appartenenza (membership function e loro forma). Ogni variabile linguistica avrà una rappresentazione simile a quella di fig. 2.7 con i vari termini (B, basso; M, medio; A, alto) rappresentati da altrettanti insiemi fuzzy delimitati da membership function scelte opportunamente.

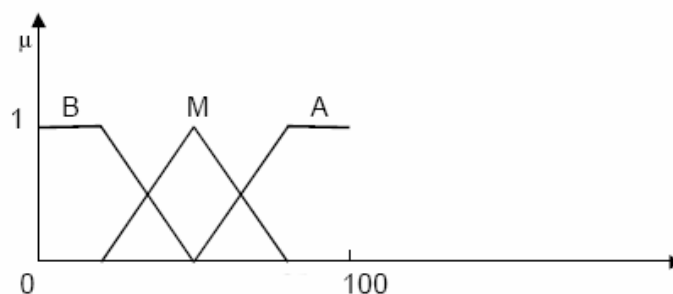


Fig. 2.7 – Rappresentazione tipica in fuzzy set della variabile linguistica suddivisa in 3 termini (Basso, Medio, Alto)

- Definizione delle regole di inferenza. Il numero delle regole varia in funzione della quantità delle variabili linguistiche in ingresso e del numero di termini in cui ciascuna è suddivisa (in genere da 2 a 7). Le regole vengono rappresentate in una matrice rettangolare detta tabella di decisione i cui elementi sono le conclusioni delle varie regole. In fig. 2.8 è riportata la tabella decisionale di un sistema a due variabili in ingresso A e B ed una in uscita C.

	$B_1 \dots$	B_j	$\dots B_m$
A_1			
\dots			
A_i		C_{ij}	
\dots			
A_n			

Fig. 2.8 – Tabella decisionale, riepilogo delle regole di inferenza del tipo

“if x is A_i and y is B_j then z is C_{ij} ”

- Valutazione delle regole: dati gli ingressi come valori crisp si deve trovare il corrispondente valore dell'uscita. Si confronta il singolo valore di ingresso con le funzioni di appartenenza che rappresentano i termini delle variabili linguistiche e se ne ottiene il grado di appartenenza a ciascun insieme fuzzy (fig. 2.9). La tabella di decisione si riduce a quella indotta, cioè alle sole regole che interessano i termini con grado di appartenenza diverso da 0.

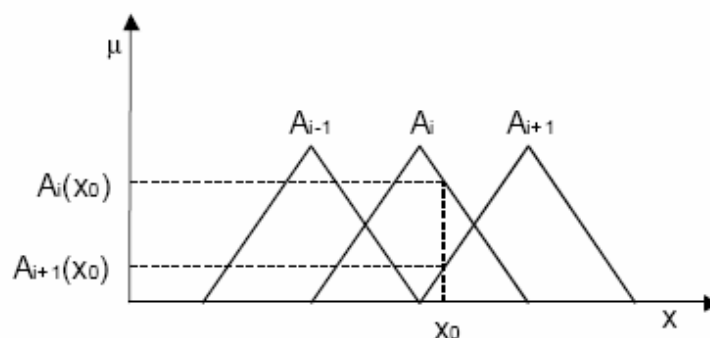


Fig. 2.9 – Valutazione della regola relativa alla variabile “A” con “ x_0 ”

valore crisp d'ingresso

- Aggregazione delle regole appartenenti alla tabella decisionale indotta. Le sole regole rimanenti devono essere aggregate tramite l'operatore logico AND, e da ciascuna regola si prende il minimo grado di appartenenza delle variabili d'ingresso: questo valore si chiama “forza della regola” (α in fig. 2.10).

	...	$B_j(y_0)$	$B_{j+1}(y_0)$...
...	0	0	0	0
$A_i(x_0)$	0	α_{ij}	$\alpha_{i,j+1}$	0
$A_{i+1}(x_0)$	0	$\alpha_{i+1,j}$	$\alpha_{i+1,j+1}$	0
...	0	0	0	0

Fig. 2.10 – Riassunto delle “forze delle regole”

- Congiunzione forze delle regole e le rispettive conclusioni: le forze delle regole devono adesso essere confrontate con le conclusioni associate per definire l'uscita di controllo, definita come la operazione di congiunzione (operatore AND, quindi valore minimo) applicata alla sua forza e alla conclusione.

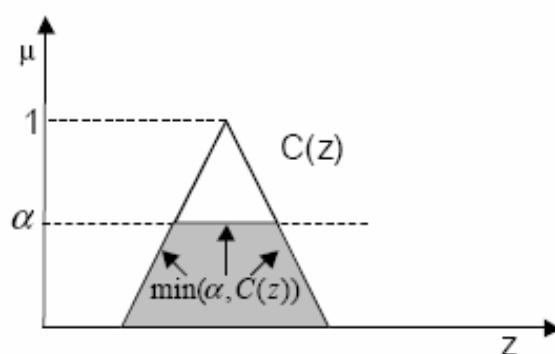


Fig. 2.11 – Congiunzione della forza della regola α e la conclusione $C(z)$ tramite l'operatore OR

- Combinazione delle uscite di controllo: le uscite di controllo di ciascuna regola devono ora essere combinate o aggregate in modo da produrre l'unica uscita di controllo. L'aggregazione avviene tramite l'operatore OR (quindi valore massimo).

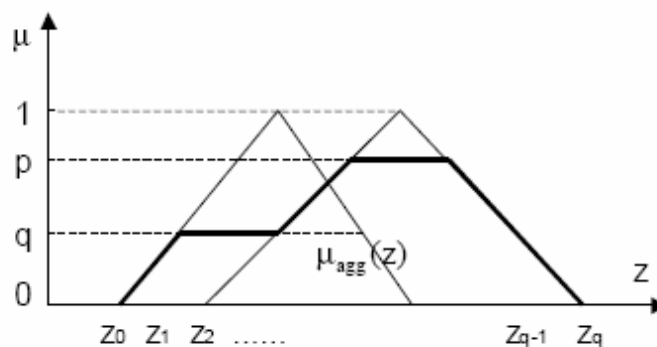


Fig. 2.12 – Risultato della combinazione delle varie uscite di controllo

- Defuzzificazione dell'uscita di controllo: per fornire in uscita un valore univoco, risultato dell'inferenza si deve defuzzificare la funzione di appartenenza μ_{agg} risultante dell'aggregazione delle uscite di controllo. Questo si può effettuare tramite vari metodi (metodo del centro dell'area, della media dei massimi, della media pesata, ecc.) da scegliere in base alle esigenze.

2.3.2.3. Applicazioni della logica fuzzy

La logica fuzzy si è dimostrata di grande utilità in parecchi problemi ingegneristici e soprattutto in quelli caratterizzati da dati e/o obiettivi affetti da una significativa incertezza. Compresi tra questi i problemi di controllo per i quali l'incertezza è presente non solo riguardo le modalità di funzionamento del processo e nelle misure delle variabili necessarie ad attuare il controllo in retroazione ma anche nelle finalità del controllo stesso che sono spesso definite in modo qualitativo (velocità di risposta elevata, ecc.). Infatti il controllo automatico è senz'altro il settore che ha visto le prime applicazioni della logica fuzzy.

Alcuni esempi si possono trovare già nei primi anni '70 nel controllo dei processi (forni, reattori, motori a vapore, ecc.) fino ad oggi dove, grazie alla produzione di circuiti integrati a basso costo, ne troviamo applicazioni anche nell'elettronica di largo consumo (regolazione messa a fuoco di fotocamere e telecamere, automazione di veicoli per la movimentazione di cose e persone, ecc.).

2.3.2.4. Applicazioni della logica fuzzy nella foratura dei FRP

Di seguito si riportano alcune, tra le molte disponibili in letteratura, delle esperienze realizzate con la logica fuzzy nei processi di foratura.

- *Controllore a logica fuzzy per massimizzare la vita utensile nella foratura di piccolo diametro* [4]: essendo la determinazione della durata delle punte di piccolo diametro molto critica vengono molto spesso sostituite precocemente per evitarne la rottura. In questo studio viene elaborato un controllore fuzzy che tramite il monitoraggio online delle azioni di taglio (forza assiale, coppia di taglio e forza radiale) fornisce una stima dello stato di usura della punta. In base allo stato di usura stimato fornisce in retroazione alla macchina il valore di avanzamento da impostare per massimizzare la vita dell'utensile. Quando l'utensile è nuovo si può utilizzare un avanzamento elevato che, col progredire dell'usura, va diminuito fino ad arrivare alla fine della vita utile con la sostituzione della punta.
- *Simulazione del processo di foratura di compositi* [5]: viene applicata la logica fuzzy in un controllore utilizzato per simulare il processo di foratura. Lo scopo di tale esperienza è quello di capire meglio il fenomeno della delaminazione ed allo stesso tempo migliorare la finitura del foro mediante il controllo dell'avanzamento ad anello chiuso. Gli stati considerati sono soltanto avanzamento e spessore forato; viene tralasciata la velocità di

taglio in quanto risultata ininfluenza sulle uscite del sistema. Come riferimento per il controllore vengono utilizzati i dati ricavati tramite la teoria di Ho-Cheng e Dharan [6] che, sfruttando la meccanica della frattura, determina il valore critico della forza di avanzamento sufficiente a indurre la delaminazione.

- *Previsione dell'usura utensile* [7]: il processo decisionale che stima l'usura della punta misurando le forze di taglio viene implementato in due modi differenti. Si confrontano i risultati ottenuti tramite un controllore fuzzy ed un neuro-fuzzy system (ANFIS) che aggiunge le peculiarità di apprendimento della rete neurale alla possibilità di gestire informazioni incerte della logica fuzzy. Entrambi, pur presentando dei limiti intrinseci, ottengono una stima corretta dell'usura della punta. Il sistema fuzzy necessita della conoscenza di base di un esperto ma permette di realizzare stime su utensili diversi, mentre la rete neurale permette una stima solo sul tipo di utensile su cui è effettuato l'apprendimento pur non necessitando della conoscenza di base di un esperto.

Per maggiori informazioni sul funzionamento di un sistema fuzzy si veda al cap. 6 dove viene trattato lo sviluppo delle regole e delle linee guida di un controllore per il processo di foratura di CFRP.

3. IL LABORATORIO MULTISENSORIALE

3.1. Premessa

Il laboratorio multisensoriale, allestito nei lavori precedenti, consente il monitoraggio completo delle grandezze coinvolte nella lavorazione di foratura tramite sensori applicati sulla macchina utensile e sull'attrezzatura portapezzo. Tutti i sensori sono interfacciati con un personal computer al fine di facilitarne la gestione. Per i dettagli relativi ad allestimento e taratura del laboratorio si rimanda a [14]. Per quanto riguarda la misurazione off-line di usura e danneggiamento si rimanda invece al capitolo 4.

3.2. La macchina

La macchina utensile su cui è stato allestito il laboratorio multisensoriale è un centro di lavoro a controllo numerico Olivetti HORIZON 450, a mandrino orizzontale, con 5 assi controllati. Uno schema di tale macchina è visibile in fig. 3.1 dove sono evidenziati 4 dei 5 assi: quelli di traslazione X, Y, Z ed uno di rotazione B. Il 5° asse non è visibile essendo costituito da un divisore ad asse orizzontale (non rappresentato in figura) montato su uno dei due pallet di cui dispone la macchina.

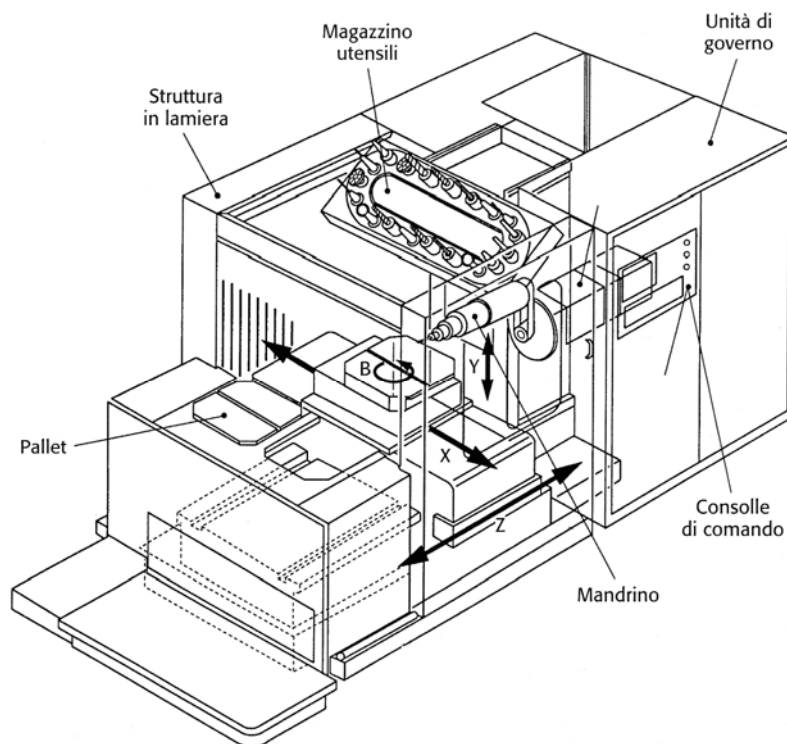


Fig. 3.1 Centro di lavoro Olivetti HORIZON 450

Inoltre la struttura della macchina è estremamente rigida, specialmente se confrontata con le forze in gioco in questo genere di lavorazione che sono notevolmente inferiori a quelle per cui la macchina è stata costruita.

Le caratteristiche della macchina sono riportate nella seguente tabella.

ASSI LINEARI	<i>Corsa asse X</i>	500 mm
	<i>Corsa asse Y</i>	500 mm
	<i>Corsa asse Z</i>	500 mm
	<i>Velocità di lavoro</i>	da 0 a 18.00 mm/min
	<i>Velocità in rapido</i>	18 m/min
	<i>Tempo di accelerazione</i>	da 0 a 18.00 mm/min → 0.2s
	<i>Precisione di posizionamento</i>	± 0.01 mm
ASSI ROTATIVI	<i>Velocità di lavoro</i>	da 0 a 20 g/min
	<i>Precisione di posizionamento</i>	± 5"
MANDRINO	<i>Potenza installata</i>	10kW
	<i>Coppia massima</i>	420 Nm
	<i>Velocità a coppia costante</i>	da 25 a 150 giri/min
	<i>Velocità a potenza costante</i>	da 150 a 5000 giri/min

Tab. 3.1 – Caratteristiche del centro di lavoro Olivetti HORIZON 450

Pur essendo la macchina a controllo numerico non è stato possibile eseguire le operazioni realizzando un opportuno programma: si è dovuto lavorare in manuale per poter variare i parametri di taglio di ogni foro ed eseguire la misura dell'usura utensile subito dopo ciascuna foratura.

Queste prove di foratura vengono realizzate su provini a spessore variabile ma, qualunque sia il materiale da analizzare, sempre nel formato rettangolare 110x120mm. Ottimizzando al massimo lo spazio disponibile si possono realizzare su un unico provino 35 fori da 8mm (divisi in 5 file da 7). Il provino sottoposto a foratura è presentato davanti al mandrino grazie ad una attrezzatura di bloccaggio appositamente costruita e montata su uno dei due pallet disponibili (vedere fig. 3.2): questa è costituita da una squadra a 90° che mantiene il provino perpendicolare all'asse mandrino e ne consente lo spostamento in direzione verticale per passare da una fila e l'altra di fori. Il bloccaggio avviene grazie ad una serie di spintori a vite con testa orientabile che distribuisce la spinta di bloccaggio in maniera omogenea su tutta la superficie del provino.




*Fig. 3.2 – A sinistra l’attrezzatura di bloccaggio provino installata sul pallet
e a destra il sistema di aspirazione del truciolo*

La macchina utensile è stata inoltre dotata di un sistema di aspirazione appositamente costruito per questo genere di prove. Viene così evitato che il truciolo, molto frammentato, ad alto potere abrasivo, possa nuocere sia alla macchina che all’operatore. Questa attrezzatura verrà successivamente sostituita da un vassoio di raccolta per poter agevolare il continuo smontaggio dell’utensile.

3.3. Lo schema del laboratorio

Sul centro di lavoro HORIZON 450 sono installati diversi sensori che effettuano il monitoraggio delle varie grandezze; questi sono interfacciati con il personal computer tramite una scheda di acquisizione. I dati una volta digitalizzati dalla suddetta scheda vengono resi disponibili all’utente tramite un programma realizzato con il software LabView 7.0 che ne permette la visualizzazione su schermo e la memorizzazione in files.

Nella tabella 3.2 sono riassunti i sensori montati a bordo macchina con le relative grandezze misurate e di seguito è rappresentato uno schema delle connessioni (fig. 3.3).

<i>SENSORE</i>		<i>GRANDEZZA MISURATA</i>
<i>PIATTAFORMA DINAMOMETRICA</i>		<i>FORZE</i> $F_x - F_y - F_z$
<i>SENSORE DI POTENZA</i>		<i>POTENZA ELETTRICA ASSORBITA</i>
<i>SENSORE DI COPPIA</i>		<i>COPPIA APPLICATA AL MANDRINO</i>
<i>DINAMO TACHIMETRICA</i>		<i>VELOCITÀ EFFETTIVA DI ROTAZIONE DEL MANDRINO</i>
<i>ACCELEROMETRO</i>		<i>ACCELERAZIONE DELL'ATTREZZATURA</i>

Tab. 3.2 – Sensori montati a bordo macchina e relative grandezze misurate

Alcune tra le grandezze direttamente misurate dai sensori del laboratorio possono anche essere ricavate indirettamente dalle misure di altre grandezze: ad esempio la potenza assorbita può essere ricavata dalla coppia applicata, moltiplicata per la velocità di rotazione, e la coppia applicata all'utensile può essere ricavata dalle risultanti delle forze F_z moltiplicate per i loro bracci (da ovvie considerazioni di equilibrio).

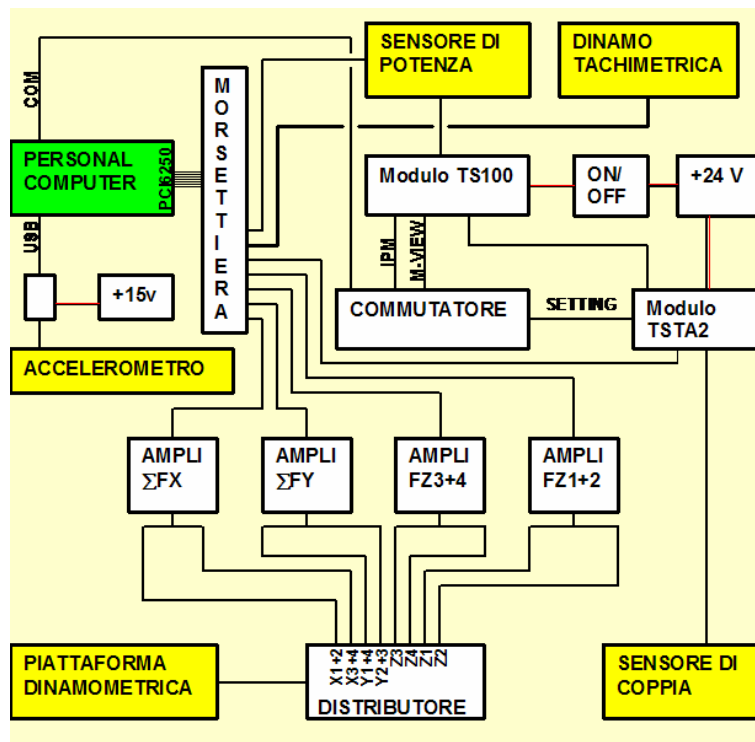


Fig. 3.3 – schema delle connessioni del laboratorio multisensoriali

3.4. I sensori

Si riporta di seguito una breve rassegna delle caratteristiche dei vari sensori; per una descrizione più dettagliata si rimanda a [14] ed ai manuali operativi di ciascuno strumento.

3.4.1. Piattaforma dinamometrica Kistler 9257 B

La piattaforma dinamometrica è direttamente interposta tra il pallet della macchina utensile e l'attrezzatura di bloccaggio del provino affinché ogni carico passi unicamente attraverso la piattaforma stessa. È dotata di quattro celle di carico piezoelettriche a 3 componenti (modello kistler 9251A, 9252A) che permettono di misurare le forze, applicate alla superficie superiore, di direzione qualsiasi (fig. 3.4).

Il funzionamento della piattaforma si basa su quella caratteristica tipica che hanno i cristalli piezoelettrici (quarzo in questo caso) di accumulare su due facce opposte cariche elettriche se sottoposti a deformazione. I carichi applicati alla faccia superiore della piattaforma passano interamente attraverso i 4 sensori provocandone la deformazione (comunque trascurabile) e quindi, in corrispondenza di variazioni di carico, si ha l'emissione di un segnale da parte del trasduttore.

L'interfaccia con attrezzature portapezzo o bancali di macchine utensili è garantita da un robusto alloggiamento in acciaio nel quale sono ricavate 4 asole per il bloccaggio.

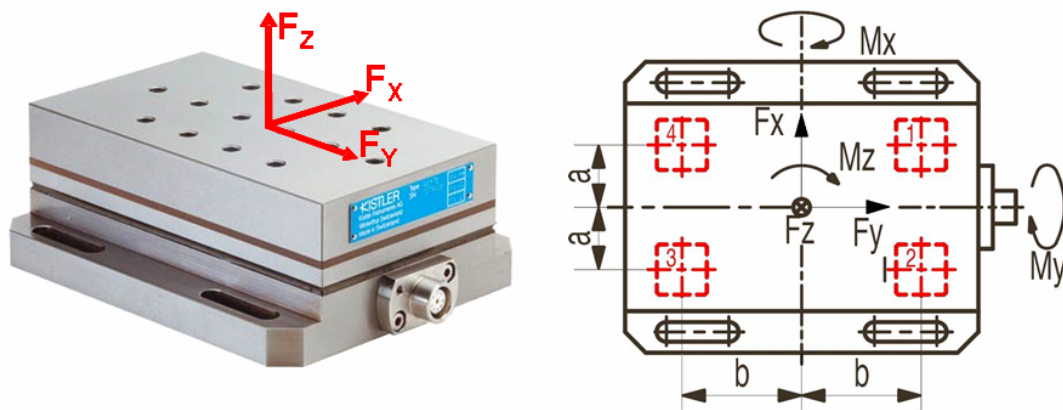


Fig. 3.4 – Piattaforma dinamometrica Kistler e grandezze rilevate

Technical Data			
Range	F_x, F_y, F_z	kN	-5 ... 5 *)
F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	F_z	kN	-5 ... 10 **)
Calibrated partial range 1	F_x, F_y	N	0 ... 500
	F_z	N	0 ... 1000
Calibrated partial range 2	F_x, F_y	N	0 ... 50
	F_z	N	0 ... 100
Overload	F_x, F_y, F_z	kN	-7,5/7,5
F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	F_z	kN	-7,5/15
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	$\approx -7,5$
	F_z	pC/N	$\approx -3,7$
Linearity, all ranges		% FSO	$\leq \pm 1$
Hysteresis, all ranges		% FSO	$\leq 0,5$
Cross talk		%	$\leq \pm 2$
Rigidity	c_x, c_y	kN/ μ m	>1
	c_z	kN/ μ m	>2
Natural frequency	$f_o (x, y, z)$	kHz	$\approx 3,5$
Natural frequency	$f_o (x, y)$	kHz	$\approx 2,3$
(mounted on flanges)	$f_o (z)$	kHz	$\approx 3,5$
Operating temperature range		$^{\circ}$ C	0 ... 70
Temperature coefficient		%/ $^{\circ}$ C	-0,02
of sensitivity			
Capacitance (of channel)		pF	≈ 220
Insulation resistance (20 $^{\circ}$C)		Ω	$> 10^{13}$
Ground insulation		Ω	$> 10^8$
Protection class		-	IP 67 ***)
Weight		kg	7,3

Tab. 3.3 – Caratteristiche tecniche della piattaforma dinamometrica

In uscita dalla piattaforma sono disponibili i segnali provenienti dalle singole celle di carico (F_{x1+2} , F_{x3+4} , F_{y1+2} , F_{y3+4} , F_{z1} , F_{z2} , F_{z3} , F_{z4}) che, tramite cavi BNC ed elementi sommatore, sono interfacciati a 4 amplificatori di carica Kistler 5011. Tali amplificatori di carica hanno il compito di trasformare e scalare opportunamente i segnali in ingresso (ΣF_x , ΣF_y , F_{z3+4} , F_{z1+2}) in funzione del valore massimo ipotizzato. Oltre a questo gli amplificatori di carica permettono l'utilizzo dei trasduttori piezoelettrici anche per letture quasi statiche aumentando artificialmente il tempo di scarica tipico

del cristallo di quarzo (si comporta come un condensatore): così facendo aumentano la flessibilità dei trasduttori piezoelettrici.

I parametri fondamentali da settare sugli amplificatori di carica sono la costante di tempo e la frequenza di taglio del filtro passa bassa, entrambi in funzione della frequenza del fenomeno da monitorare. La taratura è invece effettuata dal produttore che fornisce lo strumento di certificato riportante la sensitività dello strumento.

I vantaggi di utilizzare questo tipo di sensore sono una grande precisione, una ridotta sensibilità alle variazioni di temperatura ed una costruzione solida che garantisce grande rigidità e quindi elevate frequenze proprie. Risultano per questo sensori di facile integrazione nelle macchine utensili.

3.4.2. Sensore di potenza Montronix PS 100 DGM

Questo sensore misura la potenza elettrica assorbita dal motore del mandrino: la misurazione avviene conoscendo la tensione corrispondente a ciascuna delle tre fasi del motore e misurandone la corrente tramite effetto Hall. Lo strumento, tramite apposito modulo, adegua automaticamente il guadagno e l'offset del sensore ed esegue inoltre il filtraggio del segnale. Così facendo il sensore è in grado di rilevare anche ridottissime variazioni di potenza ed è utilizzabile anche in applicazioni atipiche, quali forature di piccolo diametro su macchine utensili di grande potenza.

La taratura viene eseguita valutando la potenza assorbita dal motore una volta noti il rendimento, la coppia applicata e la velocità di rotazione del mandrino (misurate rispettivamente tramite il sensore Accue-Torque e la dinamo tachimetrica).

3.4.3. Sensore di coppia Montronix Accue-Torque

Il sensore di coppia Montronix Accue-Torque consiste in una serie di estensimetri che misurando la deformazione torsionale di una sezione del portautensile forniscono una misura della coppia applicata, che coincide con la coppia di taglio. Questo sensore utilizza la tecnologia wire-less sia per l'alimentazione che per la trasmissione dei dati, quindi non vi sono contatti striscianti tra la parte fissa e quella rotante.

L'alimentazione, la conversione in volt del segnale da essa proveniente e la sua amplificazione sono affidate al modulo Montronix TSTA-2 con il quale dialoga attraverso il modulo Hyperlink. Le impostazioni possono appunto essere effettuate tramite suddetto modulo.

La taratura del sensore di coppia viene effettuata una volta montato sulla macchina tramite l'applicazione di una coppia nota individuando la costante di proporzionalità tra segnale in volt misurato e coppia applicata.

3.4.4. Dinamo tachimetrica

Per poter monitorare la velocità effettiva del mandrino è stato intercettato e condotto alla scheda di acquisizione il segnale proveniente dalla dinamo tachimetrica utilizzata dall'azionamento della macchina utensile stessa. In questo modo è possibile seguire le variazioni di velocità rispetto al valore impostato.

La taratura del sensore e la determinazione della costante caratteristica della dinamo sono state realizzate facendo ruotare il mandrino, privo di carico, a varie velocità: per ciascuna è stata effettuata la misura della tensione in uscita tramite voltmetro determinando la caratteristica RPM/V della dinamo.

3.4.5. Accelerometro Montronix Spectra Pulse

Il Montronix Spectra Pulse è composto da tre accelerometri capacitivi ed un microprocessore in grado di elaborare segnali secondo i vari programmi caricati sulla propria memoria interna. È l'unico strumento del laboratorio multisensoriale direttamente collegato al personal computer in quanto, di tipo "stand alone", fornisce informazioni direttamente utilizzabili dall'utente.

Il sensore rileva le accelerazioni nelle tre direzioni e può essere utilizzato per monitorare le vibrazioni indotte dalla lavorazione così da individuare eventuali anomalie (risonanze, urti, eccentricità, ecc.).

Può essere applicato tramite 4 viti sull'attrezzatura, ma per aumentarne la flessibilità e la rapidità di utilizzo è stato costruito un apposito supporto magnetico che permette di applicare il sensore su qualsiasi superficie (purché magnetica) senza necessità di forarla.

3.5. Acquisizione dati

3.5.1. Scheda di acquisizione National Instrument PCI 6250

Tutti i sensori appena citati, eccetto l'accelerometro, sono collegati al personal computer tramite questa scheda di acquisizione che ha il compito di digitalizzare i segnali analogici in ingresso convertendoli in digitali a 16 bit. Il settaggio e la configurazione della scheda, per i quali si rimanda a [14] vengono eseguiti tramite il software LabView.

3.5.2. Il software LabView 7.0

Questo software esegue la configurazione della scheda di acquisizione, la visualizzazione dei segnali acquisiti, la loro elaborazione e memorizzazione in files. La caratteristica principale di questo software è quella di permettere la configurazione dell'hardware in maniera rapida, riconoscendo automaticamente le schede di acquisizione compatibili installate sul PC. Appena visualizzati i canali disponibili l'utente seleziona il tipo di ingresso (tipicamente una tensione) e

setta i parametri per ciascun segnale (range d'ingresso, modalità di acquisizione, frequenza di campionamento, tipo di connessione a terra, eventuali trigger ed altro).

Il programma, tramite autocomposizione, genera una struttura di base in grado di acquisire i segnali e visualizzarli; successivamente questa struttura può essere arricchita dall'utente inserendo tramite drag & drop gli strumenti virtuali (VI) tra quelli disponibili nella libreria. Si ha una notevole varietà di VI, che vanno dai più semplici in grado di compiere operazioni matematiche (somma, sottrazione, ecc.) a quelli che effettuano complesse elaborazioni dei segnali (analisi frequenza, filtraggi, ecc.) a quelli che visualizzano a schermo o salvano in files i vari segnali.

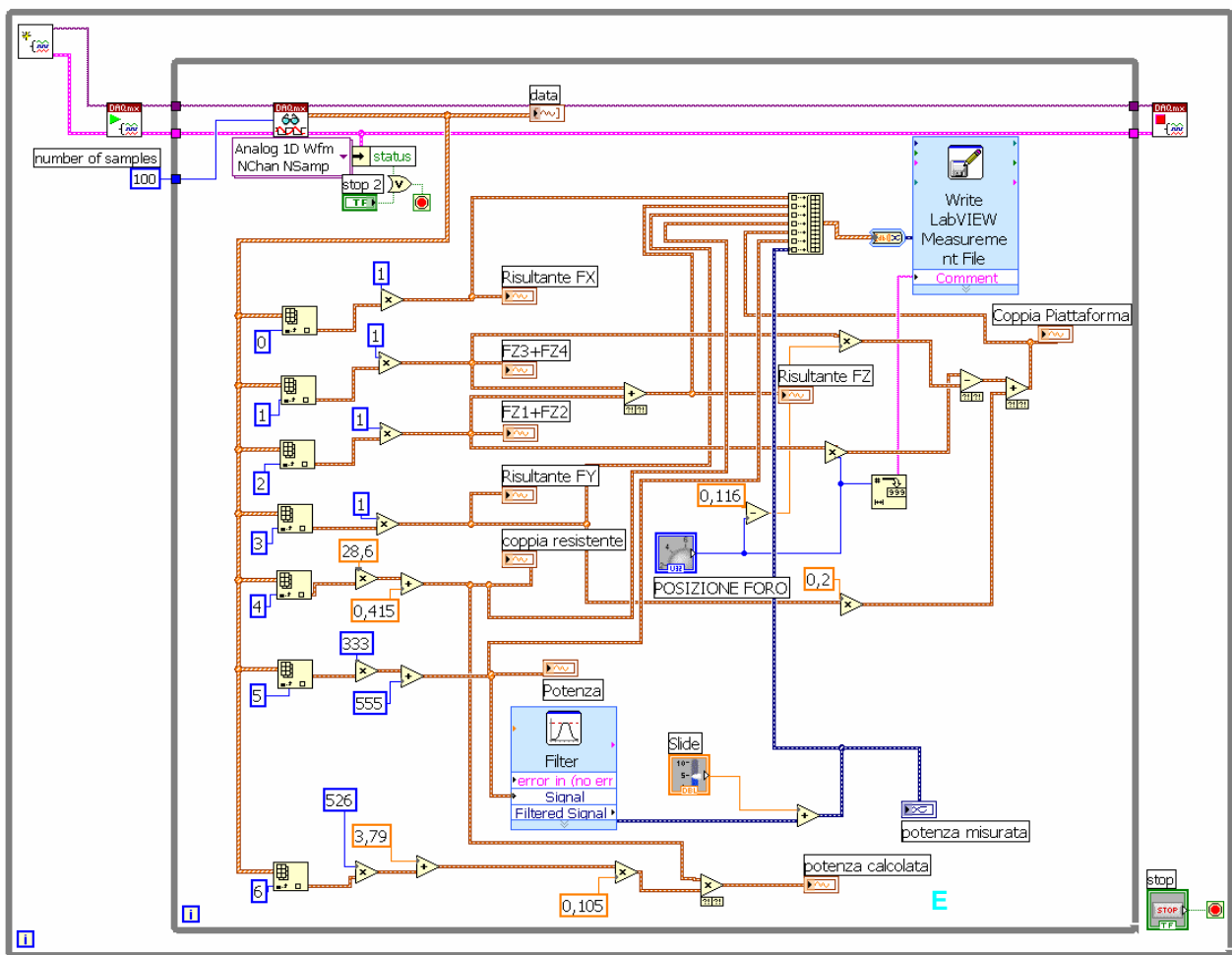


Fig. 3.5 – Schema a blocchi del programma LabView che gestisce i dati del laboratorio

In fig. 3.5 è riportato il diagramma a blocchi del programma utilizzato per l'elaborazione dei dati ricavati dai sensori. In uscita si hanno disponibili in un file di testo di estensione *lvm* i seguenti dati:

- risultante F_x ;
- risultante F_y ;
- risultante F_z ;

- coppia misurata
- coppia calcolata da F_x , F_y , F_z ,
- potenza misurata
- velocità di rotazione mandrino
- potenza calcolata da coppia e velocità mandrino

Nella seguente figura è invece rappresentata l'interfaccia del programma dove si possono annotare i parametri di foratura e scegliere il file nel quale verranno salvati i risultati in uscita. Il selettore "posizione" è stato previsto per poter scegliere la posizione relativa del foro rispetto all'attrezzatura, quindi calcolare la coppia come prodotto delle componenti F_z e F_y per i rispettivi bracci e poterla confrontare con quella direttamente misurata dal sensore di coppia. Da prove precedenti, il calcolo della coppia eseguito con tale metodo è però risultato essere poco efficace in quanto produce dei dati in uscita molto rumorosi: viene perciò preferita la misura diretta eseguita dal sensore.

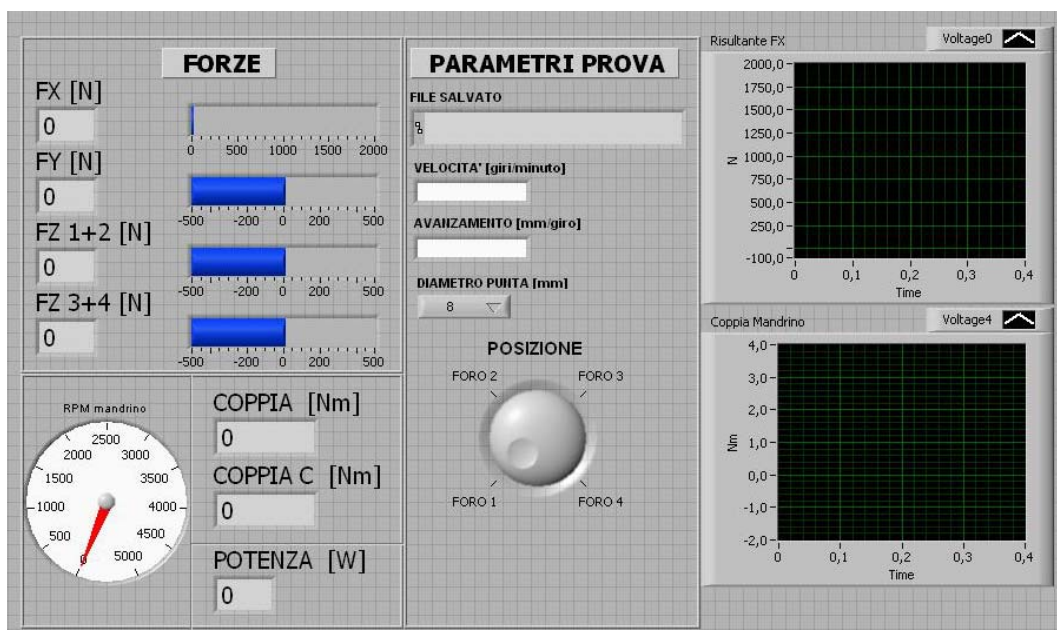


Fig. 3.6 – Maschera di interfaccia del programma LabView

La registrazione dei dati si avvia appena la F_x supera un valore di soglia impostato dall'utente; questo perché il programma necessita di un segnale di trigger che funzioni da interruttore.

Il programma, realizzato nei lavori precedenti con il software LabView, può ulteriormente essere ampliato o modificato in base alle esigenze attuali o future.

3.5.3. Trattamento dei dati acquisiti

I dati acquisiti e memorizzati nel file di estensione *lvm*, scelto tramite la maschera d'interfaccia LabView, possono essere elaborati una volta importati all'interno di un foglio di lavoro Excel.

Una volta eseguita l'importazione, tramite il menu “*importa dati esterni*”, è possibile elaborarli tramite il foglio di calcolo per ricavare i valori massimo e medio, l'andamento in funzione del tempo o dello spessore forato, ecc..

Per velocizzare le operazioni di gestione dei dati è stata realizzata una macro (*inserisci_formule_Fxmedio*) all'interno del foglio di lavoro Excel che applica in maniera automatica le formule e fornisce in uscita una tabella riepilogativa con la forza massima registrata $F_{x\ max}$, quella media calcolata su un intervallo prestabilito $F_{x\ media}$ ed altri dati utili alla comprensione del fenomeno.

Tale macro potrà in futuro essere ampliata e sviluppata per eventuali nuove esigenze.

3.6. Obiettivo del lavoro di tesi

Gli obiettivi di questo lavoro di tesi sono molteplici e posso essere così riassunti:

4. Validazione del laboratorio TCM;
5. Realizzazione di un sistema in grado di misurare in modo accurato e ripetibile l'usura prodotta sull'utensile;
6. Realizzazione di un sistema capace di quantificare in modo semplice il danneggiamento prodotto sul foro;
7. Svolgimento di una prima campagna di prove di foratura atte a testare i precedenti sistemi;
8. Realizzazione di una seconda e più ampia campagna di prove per l'analisi dei fenomeni che intervengono durante il processo di foratura dei CFRP;
9. Proporre un controllore per il processo di foratura.

4. MISURAZIONE DEL DANNEGGIAMENTO INDOTTO E DELL'USURA UTENSILE

4.1. Premessa

Le prove eseguite nel corso di questa tesi sono state realizzate nel laboratorio TCM allestito durante lavori precedenti e brevemente descritto nel capitolo 3. Il sistema per applicazioni TCM consente, oltre al monitoraggio on-line, la misurazione di usura utensile e danneggiamento indotto. In questo modo si possono correlare le variazioni dei valori registrati on-line dai sensori con le variazioni di usura e danneggiamento. Le suddette misurazioni vengono effettuate tramite un microscopio ottico Nikon dotato di fotocamera digitale ed apposito software per l'analisi dell'immagine.

In questo capitolo vengono descritte le modifiche apportate al metodo sviluppato nei lavori precedenti in modo tale da renderlo maggiormente preciso, ripetibile ed automatizzabile.

4.2. Danneggiamento indotto ed usura utensile

4.2.1. Usura utensile

Durante la foratura dei metalli l'usura può manifestarsi sulle punte elicoidali in varie zone e con modalità differenti (fig. 4.1).

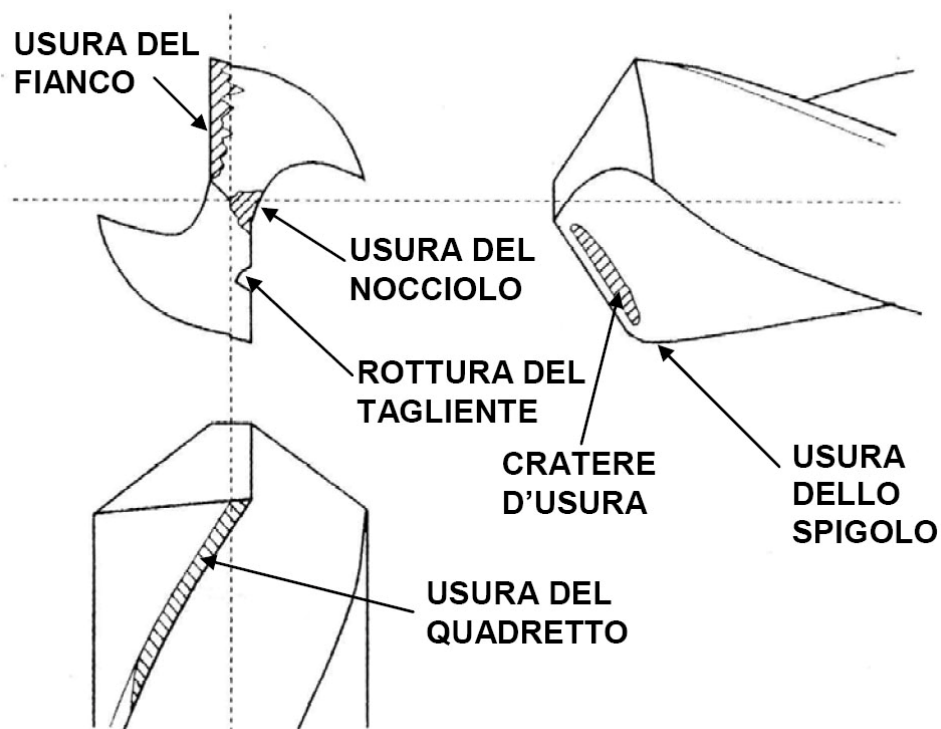


Fig. 4.1 – Zone soggette ad usura in una punta elicoidale nella foratura dei metalli

Nella foratura di materiali compositi rinforzati con fibre la causa di tale usura è totalmente imputabile all'azione abrasiva delle fibre vista la limitata resistenza meccanica della matrice. Le aree maggiormente interessate da tali fenomeni sono soprattutto il fianco e lo spigolo: non si ha, contrariamente a quello che succede nei metalli, rottura del tagliente e cratere d'usura sul petto del tagliente.

Nello svolgimento di questo lavoro si è cercato di correlare le misure ricavate dal monitoraggio online con lo stato di usura della punta e per far ciò si è ritenuto sufficiente quantificare l'usura con la sola misura dell'usura sul fianco.

Per effettuare questa misura è stato utilizzato il microscopio ottico Nikon SMZ800 dotato di fotocamera digitale e software di analisi dell'immagine (vedere in seguito per i dettagli).



Fig. 4.2 – Fotografia eseguita al microscopio Nikon SMZ800; si nota la differente inclinazione dell'area usurata e la possibilità di evidenziarla con l'illuminazione in base all'orientamento punta.

Orientando opportunamente la punta si può evidenziare sia la zona usurata, sia la zona non usurata del tagliente. Una volta posizionato opportunamente l'utensile, per quantificarne l'usura sul fianco viene misurata l'area della zona usurata. Si noti che non viene misurato lo sviluppo effettivo dell'area usurata, ma una sua proiezione su un piano perpendicolare all'asse ottico del microscopio; il valore, espresso in mm^2 risulta comunque un efficace indice dell'usura effettiva.

È stata inoltre valutata la possibilità di determinare l'area usurata come differenza tra l'area del petto utensile da nuovo e l'area della parte non usurata dopo la foratura: è stato però scartato questo metodo in quanto è risultato difficile apprezzare piccoli valori dell'usura.

4.2.2. Delaminazione

Come accennato nel capitolo 2 la delaminazione è il danno più grave generato dalla foratura e la sua misurazione può essere utilizzata per fornire un indice della qualità del foro ottenuto. Nell'ambito di questo studio si è ritenuto sufficiente considerare soltanto il danneggiamento generato nella fase di uscita (push out) dove il fenomeno è più ampio.

Un indice comunemente utilizzato per la misura della delaminazione è il DF (delamination factor): esso è definito dal rapporto tra il diametro (D_{\max} in fig. 4.3) della circonferenza circoscritta alla zona delaminata ed il diametro nominale. Questo dà un'indicazione della delaminazione massima registrata in un foro, e quindi può essere influenzata notevolmente dal sollevamento di un singolo gruppo di fibre senza che la delaminazione sia distribuita attorno a tutta la circonferenza. Conviene perciò associare al DF un altro indice che fornisca l'entità media della delaminazione.

Il DF è inoltre strettamente legato alla dimensione caratteristica di trama ed ordito nel caso di fibre disposte a tessuto come quelle oggetto di questa tesi. L'intreccio delle fibre impedisce infatti la propagazione della frattura e l'entità massima di questa sarà perciò uguale alla dimensione caratteristica di trama ed ordito.

Per questo motivo è stato perciò preferito quantificare la delaminazione tramite l'indice I_{medio} così definito:

$$I_{\text{medio}} = \frac{A_{\text{delaminata}}}{\pi \cdot D_{\text{nom}}} \cdot \frac{1}{D_{\text{nom}}/2} \quad (4.1)$$

$$A_{\text{delaminata}} = A_{\text{misurata}} - \frac{\pi \cdot D_{\text{nom}}^2}{4} \quad (4.2)$$



Fig. 4.3 – Area delaminata: fotografia realizzata con Nikon SMZ 800

Dove $A_{misurata}$ è l'area compresa all'interno della zona danneggiata (in rosso in fig. 4.3) ed $A_{delaminata}$ è l'area che si ottiene sottraendo a quella misurata la superficie del foro nominale (in verde in fig. 4.3). Considerando una corona circolare di diametro interno D_{nom} e di area equivalente ad $A_{delaminata}$, I_{medio} è il rapporto tra lo spessore della suddetta corona circolare ed il raggio nominale. L'indice I_{medio} fornisce perciò un'indicazione media dell'ampiezza della zona delaminata in rapporto al diametro nominale; si possono quindi eseguire confronti tra i danneggiamenti procurati da forature di diverso diametro.

Al contrario, nel caso di compositi con fibre a disposizione casuale o monodirezionale, il DF sarebbe stato di notevole aiuto completando le indicazioni fornite dall' I_{medio} .

4.3. Gli strumenti utilizzati

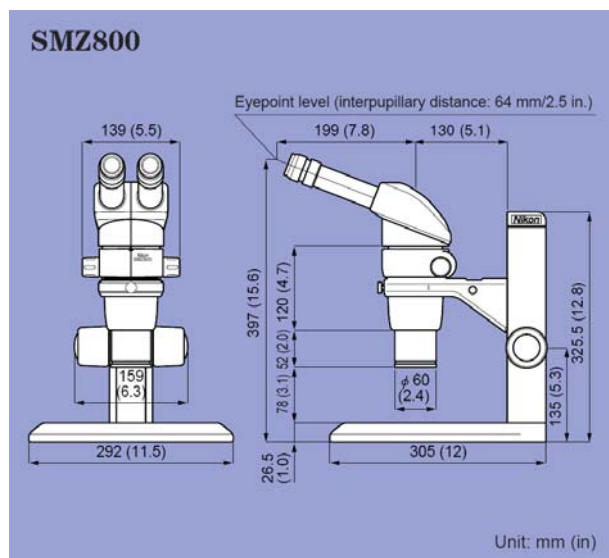
Esistono varie tecniche e vari strumenti di misura della delaminazione (misurazione ottica diretta, analisi digitale dell'immagine, analisi dell'immagine ricavata tramite raggi X, tecnica shadow moiré, ultrasuoni, ecc.) ognuno dei quali presenta vantaggi e svantaggi tipici della tecnica stessa (per una panoramica di queste si rimanda a [14]). In questo lavoro viene utilizzata la tecnica di analisi digitale dell'immagine utilizzata anche in studi precedenti, apportando però a procedure ed attrezzature già esistenti degli affinamenti per quanto concerne la precisione, la ripetibilità e la facilità d'uso.

4.4. Il microscopio ottico ed il software di misura

Per effettuare le misurazioni necessarie a quantificare l'usura sul fianco dell'utensile ed il danneggiamento prodotto sul provino è stato utilizzato un microscopio ottico Nikon SMZ800 acquisendo le immagini con una fotocamera digitale per poi elaborarle con un apposito software di analisi dell'immagine.

4.4.1. Il microscopio Nikon SMZ800

Il Nikon SMZ800 è un microscopio ottico stereoscopico che consente, in abbinamento all'oculare 10x ed obiettivo standard 1x, ingrandimenti da 10x a 63x senza sostituire gli obiettivi ma tramite un semplice meccanismo zoom. Questi ingrandimenti sono ampiamente sufficienti per la misurazione di usura e danneggiamento ed inoltre permettono di analizzare a fondo la struttura del composito prima e dopo la foratura, affiancando così un'accurata analisi qualitativa a quella quantitativa.



Zoom	<i>1x-6.3x</i>
Obiettivi	<i>P-Plan Apo 1x</i>
	<i>P-Plan Apo 0.5x</i>
Oculare	<i>C-W 10x</i>
Sistema di illuminazione	<i>Anulare a LED regolabile</i>
	<i>P-ICI2 Episcopico coassiale (1.5x)</i>
Ingrandimento totale	<i>5x-94.5x (con P-ICI2)</i>

Fig. 4.4 –Nikon SMZ 800

È dotato di un illuminatore coassiale a LED ad intensità regolabile che permette un'illuminazione particolarmente diffusa ed una colorazione molto fredda a qualsiasi intensità d'illuminazione. Avendo una struttura modulare può essere dotato di numerosi accessori e quindi consentire ulteriori upgrade nel futuro [15].

4.4.2. Acquisizione immagine tramite fotocamera

L'acquisizione delle immagini dal microscopio SMZ800 vengono effettuate tramite una fotocamera digitale non dedicata: per ridurre i costi, il microscopio è stato infatti dotato di una fotocamera

digitale consumer al posto della digital camera a corredo. Monta perciò, mediante un apposito beam splitter, una fotocamera Canon Powershot S80 da 8 megapixel che può però essere comandata in remoto dal personal computer e permette l'impostazione manuale di diaframma, tempo di esposizione, sensibilità e messa a fuoco.

Il beam splitter, modulo aggiuntivo interposto tra obiettivo ed oculare, tramite uno specchio semitrasparente preleva l'immagine destinata ad uno dei due oculari e la rende disponibile ad un terzo tubo, sul quale tramite appositi adattatori è montata la Powershot S80. Essendo l'immagine prelevata quella relativa ad un solo oculare si perdono i vantaggi garantiti dalla visione stereoscopica che si ha invece grazie ai due oculari; l'immagine catturata dalla fotocamera risulterà infatti più piatta, fornendo una minor sensazione di profondità.

Il collegamento ottico della fotocamera è garantito dall'apposito adattatore per Nikon Coolpix 0,45x e da un adattatore artigianale, in pratica un doppietto di lenti, necessario ad ottenere lo stesso ingrandimento del sistema obiettivo/oculare ed a mantenere la parafo calità con gli oculari. La ripresa sarà perciò del tipo in luce parallela, caratteristica di quegli apparecchi fotografici a cui non si può smontare l'obiettivo (fig. 4.2).

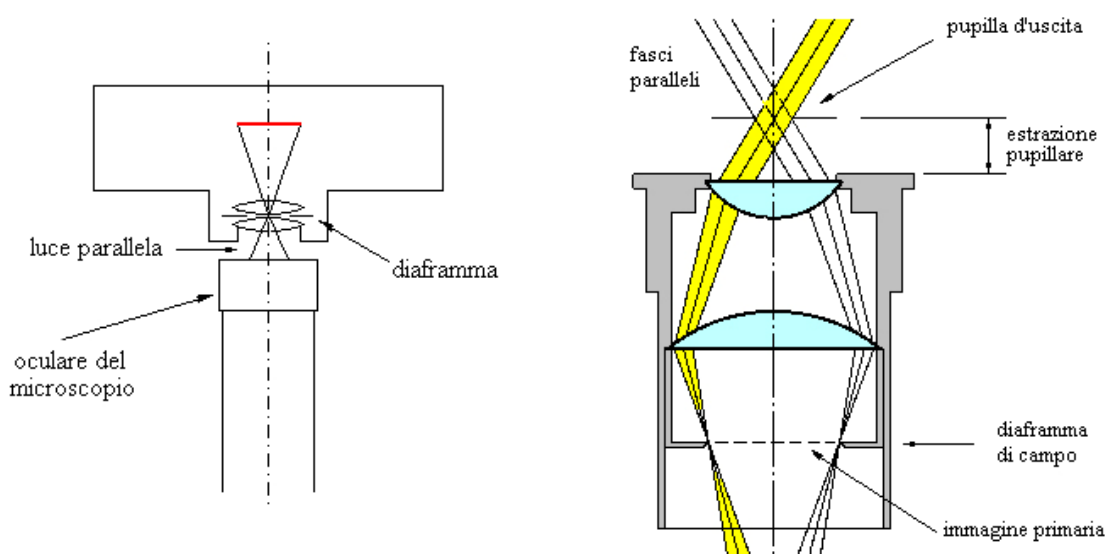


Fig. 4.2 –Schema ottico della ripresa in luce parallela e dell'estrazione pupillare

Il collegamento meccanico della fotocamera è invece garantito da un accessorio Canon acquistabile separatamente ed un anello di raccordo M23/M37 in alluminio appositamente costruito (fig. 4.3). Questi permettono di mantenere l'obiettivo della fotocamera coassiale con il terzo tubo con sufficiente stabilità.

Inoltre essendo la macchina fotografica non dedicata e montata tramite adattatori artigianali non otticamente corretti le immagini ricavate sono affette da aberrazioni cromatiche, distorsione e vignettatura. La vignettatura è presente perché il diaframma della fotocamera non si trova esattamente sul piano della pupilla d'uscita (vedere fig. 4.2) ma intercetta prima il cono: può però essere quasi totalmente eliminata agendo sullo zoom della fotocamera. Utilizzando infatti la massima lunghezza focale della macchina, la vignettatura diminuisce notevolmente (fig. 4.3), anche se si perde la parafozialità con gli oculari e si è obbligati ad eseguire la messa a fuoco dal display della fotocamera. Utilizzando la Canon S80 alla sua massima focale diminuisce anche la distorsione a botte tipica delle corte focali. Le aberrazioni cromatiche, che si presentano soprattutto ai bordi e nelle zone di forte contrasto, purtroppo non possono essere eliminate se non con software per l'elaborazione dell'immagine. Ad ogni modo questi difetti comunque non influiscono sulla bontà delle misure effettuate per gli scopi di questo lavoro di tesi.

Per evitare il mosso, causato dalle vibrazioni generate premendo il pulsante di scatto, è consigliabile realizzare gli scatti tramite autoscatto senza toccare la struttura del microscopio. Si consiglia inoltre di impostare sulla fotocamera l'opzione che consente di mantenere lo scatto eseguito a video, invece dei 2s impostati di default, finché non si preme nuovamente il pulsante di scatto in modo tale da poter acquisire con calma l'immagine dal software.

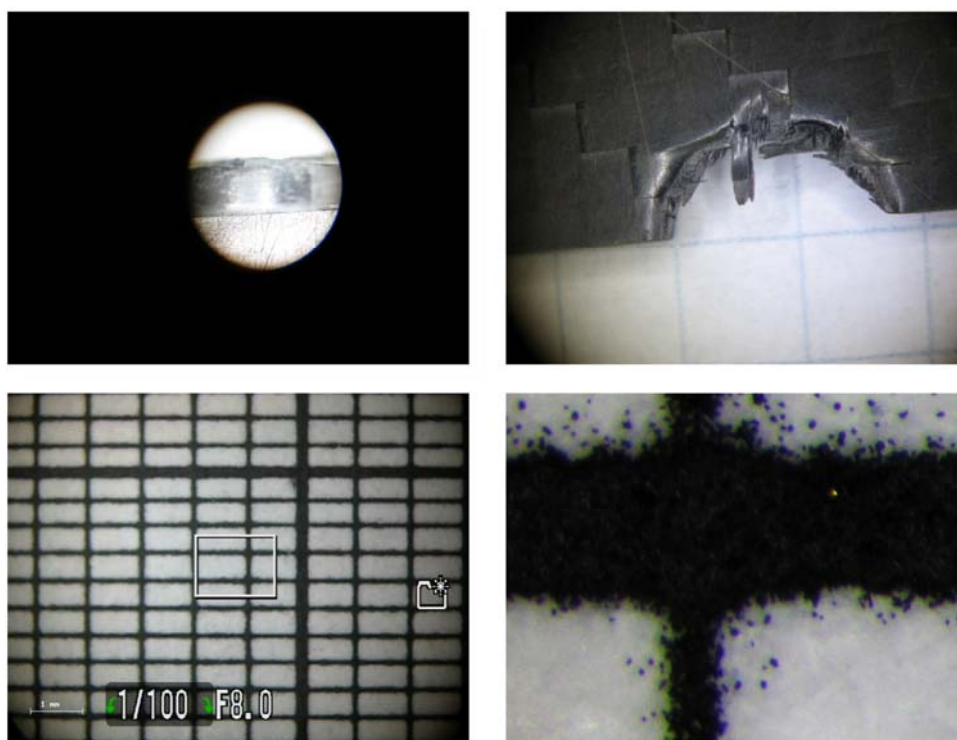


Fig. 4.3 – Difetti riscontrati con Canon S80 su Nikon SMZ800: vignettatura a focale minima (a) e massima (b), distorsioni contenute se alla massima focale (c) ed aberrazioni cromatiche (d)

4.4.3. L'attrezzatura di posizionamento utensile

Per garantire la buona riuscita delle prove effettuate ed assicurare la validità dei risultati ottenuti si richiede che le condizioni di illuminazione, messa a fuoco ed posizionamento in cui le immagini vengono acquisite siano il più possibile ripetibili. Le condizioni di illuminazione sono garantite dall'illuminatore anulare a LED, che ha un potenziometro graduato per la regolazione di intensità, e la distanza di messa a fuoco è garantita dal rapporto di ingrandimento del microscopio. Infine per garantire la precisione e la ripetibilità nel posizionamento della punta è stata progettata e costruita un'apposita attrezzatura (vedere allegato I) il più possibile flessibile in modo da non limitarne l'uso alle sole punte di diametro 8mm che sono utilizzate in questa tesi. La suddetta attrezzatura permette infatti posizionamento e bloccaggio di punte da 4 a 10mm di diametro. L'attrezzatura è stata inoltre sviluppata in modo tale da non compromettere la configurazione del microscopio che dovrà essere condiviso con altri utilizzatori per scopi differenti.

L'attrezzatura consente il massimo movimento possibile compatibilmente con lo spazio disponibile: questa si deve infatti inserire tra il basamento e l'obiettivo del microscopio, lasciando tra questi una distanza sufficiente per la messa a fuoco sulla punta in osservazione. Per garantire questa condizione e non modificare la struttura del microscopio si è scelto di sviluppare l'attrezzatura al di sotto del basamento stesso (fig. 4.4). Si sfrutta perciò il foro nel basamento, predisposto per utilizzare il microscopio in luce trasmessa con illuminazione dal basso, per far affiorare la sola parte superiore dell'attrezzatura e della punta da analizzare. Per permettere l'alloggiamento e l'utilizzazione dell'attrezzatura il microscopio deve essere rialzato tramite un supporto supplementare realizzato con profilati d'alluminio.

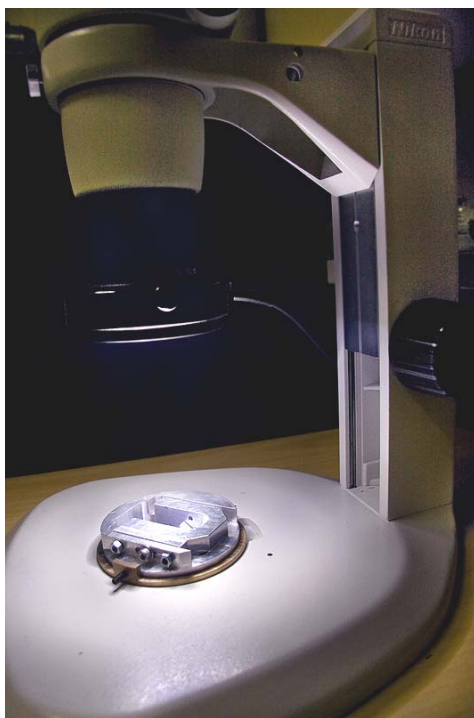


Fig. 4.4 –Installazione dell’attrezzatura sul basamento del Nikon SMZ800

L’attrezzatura è composta da un “*supporto fisso*” in ottone direttamente interfacciato al foro del basamento e fissato a questo tramite due viti M4 alloggiare in fori filettati preesistenti. Il supporto fisso funge da guida per il “*supporto mobile*”, realizzato in alluminio, al quale permette una rotazione completa attorno all’asse verticale. L’accoppiamento alluminio/ottone garantisce una buona scorrevolezza tra i due elementi evitandone l’impuntamento: il bloccaggio è garantito da due grani disposti a 180° l’uno dall’altro in modo tale che almeno uno dei due possa essere sempre in presa.

Al supporto mobile è appoggiata la “*guida supporto portapunta*” libera di muoversi in due direzioni sul piano orizzontale per poter individuare l’asse ottico del microscopio: il serraggio di questa è garantito da una vite a tesata esagonale incassata e da due grani che la spingono contro una battuta.

Ultimo elemento della catena è il “*supporto portapunta*”, imperniato sulla suddetta guida, che è libero di ruotare in un angolo di $\pm 45^\circ$ rispetto ad un asse orizzontale. Sul supporto portapunta è ricavata una scanalatura a “V” nella quale poter alloggiare e bloccare, tramite vite M4, punte a diametro variabile. Il posizionamento longitudinale sulla scanalatura a “V” è garantito da una battuta regolabile per il codolo della punta. Il posizionamento angolare attorno all’asse della punta può essere realizzato tramite una battuta meccanica per il tagliente da montare nell’apposito alloggiamento previsto sul lato superiore del supporto.

Per garantire la massima ripetibilità di posizionamenti ogni accoppiamento dell’attrezzatura è stato dotato di scala graduata. Queste sono state eseguite tramite tracciatura e per i pezzi assialsimmetrici,

dove sono presenti scale graduate angolari, è stato utilizzato sul banco di tracciatura un divisore ad asse orizzontale.

Riepilogando l'attrezzatura consente:

- Posizionamento e bloccaggio di punte di diametri di 4-10mm
- Riferimento longitudinale della punta sulla scanalatura a "V" (z)
- Rotazione e bloccaggio attorno all'asse verticale di 360° (α)
- Regolazioni sul piano orizzontale in due direzioni (x e y)
- Rotazione attorno all'asse orizzontale di +/- 45° (β)
- Rotazione e bloccaggio della punta attorno al proprio asse di 360°

Tra parentesi sono riportate le lettere con cui vengono indicati nei prossimi capitoli i posizionamenti di ciascun movimento dell'attrezzatura. Per maggiore chiarezza sono riportati, indicandone il verso positivo, sulla fotografia di fig. 4.5.

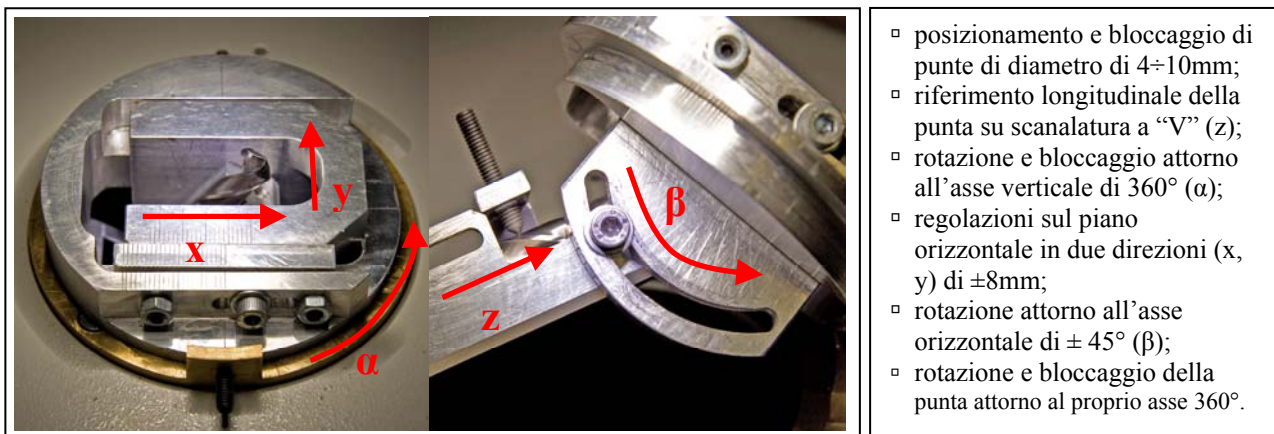


Fig. 4.5 –Possibili regolazioni dell'attrezzatura portapunta

4.4.4. Il software EasyView

Per effettuare l'analisi delle immagini acquisite si utilizza il software EasyView realizzato dalla ditta dalla quale è stato acquistato il microscopio.

Il software EasyView [16] offre molteplici possibilità (analisi dell'immagine, misurazione di lunghezze ed aree, analisi metallografia, misura semiautomatica di durezza) ma verrà utilizzato in questo lavoro di tesi quasi esclusivamente per la binarizzazione di immagini e la misurazione di aree.

La fotocamera è interfacciata al personal computer tramite una scheda di acquisizione alla quale è collegata con un cavo Video. Le immagini riprese dalla fotocamera vengono perciò registrate in formato PAL con la risoluzione di 720x576 punti, la stessa codifica della normale televisione. Così

facendo non si sfruttano appieno gli 8 megapixel della fotocamera ma si può utilizzare la comoda interfaccia dell'EasyView per effettuare le riprese e le misure sui campioni.

Per realizzare precise misure sia di lunghezze che di aree si deve prima eseguire la calibrazione del sistema microscopio/fotocamera/software, come spiegato sul manuale utente del software [16]. Questo si effettua con dall'apposito menù con l'ausilio di un micrometro oggetto, un vetrino che riporta una scala graduata lunga 10mm divisa in 100 parti. La calibrazione deve essere realizzata, sia in direzione orizzontale che verticale, posizionando il micrometro oggetto in un senso e nell'altro per poi selezionare una distanza nota indicandone la misura al software. Eseguita la calibrazione per ogni ingrandimento disponibile se ne salvano i risultati in una tabella dalla quale si potranno richiamare quando saranno necessari senza il bisogno di eseguire una successiva calibrazione.

4.4.5. Le procedure di misura

Senza entrare troppo nei dettagli, per i quali si rimanda al manuale del software, nei seguenti paragrafi vengono descritte le procedure di misura al fine di consentire in futuro la massima ripetibilità dei risultati ottenuti.

4.4.5.1. Misura dell'usura utensile

Per effettuare la misurazione dell'area usurata la punta deve essere smontata dal portautensili e posizionata opportunamente tramite l'attrezzatura. La misurazione viene eseguita su uno solo dei taglienti, dato che non esiste alcun motivo per cui le usure siano diverse tra i due. Ogni misura viene comunque eseguita sempre sullo stesso tagliente, prendendo a riferimento la scritta presente sul codolo di ogni punta: questa infatti deve essere sempre visibile quando la punta è poggiata sulla scanalatura a "V".

Per quanto riguarda il posizionamento della punta rispetto all'asse ottico del microscopio, dopo varie prove, è risultato ottimale per evidenziare l'area usurata quello definito dalle seguenti coordinate:

$$\beta = -30^\circ$$

$$\alpha = -45^\circ$$

$$x = -1.87\text{mm}$$

$$y = 3\text{mm}$$

$$z = 27\text{m}$$

Le quote β , α e z sono ricavate dalle scale graduate dell'attrezzatura, mentre le misure x e z sono effettuate con calibro a corsoio (fare riferimento alla fig. 4.6 per l'identificazione dei movimenti).

Tale posizionamento verrà utilizzato per tutte le misurazioni di usura svolte in questo lavoro di tesi.

Sempre per garantire la massima ripetibilità le condizioni di ingrandimento, illuminazione ed i parametri di scatto devono essere i medesimi per ciascuna prova: si utilizza l'illuminatore a LED alla massima intensità, lo zoom del microscopio a 2x, la fotocamera alla massima focale con diaframma f/7.1, tempo di scatto 1/100s e sensibilità ISO 50. Con questo ingrandimento si nota che la profondità di campo è sufficiente a tenere a fuoco l'intero tagliente che è disposto quasi perpendicolarmente all'asse ottico del microscopio.

Si può adesso procedere alla messa a fuoco del microscopio, che verrà eventualmente aggiustata in seguito al preciso posizionamento angolare della punta rispetto al proprio asse, che viene definito sovrapponendo all'immagine live acquisita dalla fotocamera una sagoma di riferimento anziché utilizzare una battuta meccanica sul tagliente che garantirebbe una precisione inferiore. La suddetta sagoma, ricavata dal tagliente di una punta nuova posizionata opportunamente, è memorizzabile sottoforma di immagine e dovrà essere caricata soltanto durante l'acquisizione della prima fotografia (fig. 4.6).

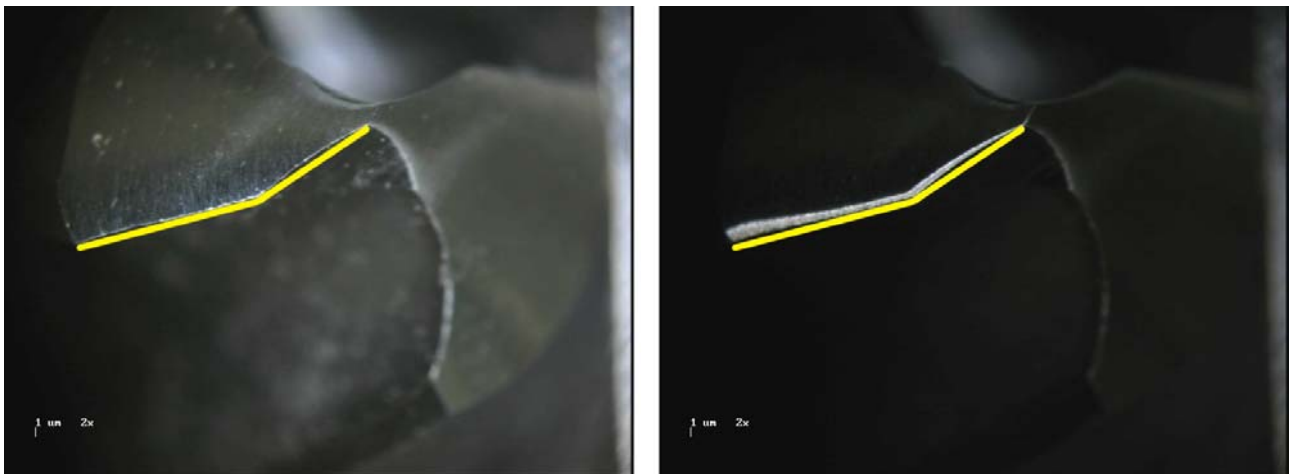


Fig. 4.6 – Posizionamento angolare della punta tramite sovrapposizione della sagoma di riferimento. La sagoma viene ricavata tramite selezione (con soglia di binarizzazione o libera) su una punta nuova (a destra) e successiva estrazione del contorno tramite l'apposito comando. Il contorno rimane sovrapposto all'immagine live spuntando la voce “sovrapposizione contorni” dal menu “comunicazioni” (a sinistra)

Una volta raggiunto il giusto posizionamento si può eventualmente affinare la messa a fuoco sul tagliente, si scatta la fotografia (con autoscatto) e si acquisisce l'immagine tramite l'apposito comando dell'EasyView. Adesso l'immagine è disponibile al software sia per eseguire la misura sia per il salvataggio su disco.

Per eseguire la misurazione dell'area usurata la procedura è la medesima sia che l'immagine acquisita provenga direttamente dal live-view oppure sia stata richiamata tra quelle salvate su disco; una volta scelta l'immagine sulla quale effettuare la misura si deve scegliere dalla tabella contenente tutte le calibrazioni quella adeguata alla configurazione attuale (dal menu "configurazione → scegli obiettivo → 2x").

Si procede perciò alla selezione dell'area usurata tramite il comando "elaborazione immagine" nella palette di destra, selezionando la funzione "select" si sceglie il colore bianco (255, 255, 255), in genere sempre presente nelle immagini in corrispondenza della scritta della scala (fig. 4.7.a). Si imposta successivamente il valore di soglia adeguato che rimarrà lo stesso per tutte le misurazioni: nel caso in esame è stato utilizzato il valore 185 (fig.4.7.b). Si vede a schermo la zona selezionata evidenziata in rosso. Si procede successivamente all'eliminazione manuale delle aree selezionate non desiderate cliccando su "all", che apre il menù di "elaborazione area/colore". Da qui (fig. 4.7.c) si può impostare il valore minimo di area desiderato, cancellando tutte le selezioni con area inferiore, oppure eliminarle manualmente cliccando (shift + sinistro) direttamente sull'immagine. Una volta raggiunta la selezione desiderata si ottiene il report dal quale si andranno a prelevare i dati utili, primo tra tutti la voce "area oggetti" che rappresenta l'area usurata cercata.

Tale procedura è da ripetere ogni volta, a meno che le varie misure non vengano eseguite in sequenza. In tal caso EasyView mantiene attivi gli ultimi criteri di selezione e quindi non sarà necessario impostare né la soglia né l'area minima accettabile; si dovrà soltanto affinare la selezione eliminando le aree in eccesso.



Fig. 4.7 – Definizione soglia di binarizzazione

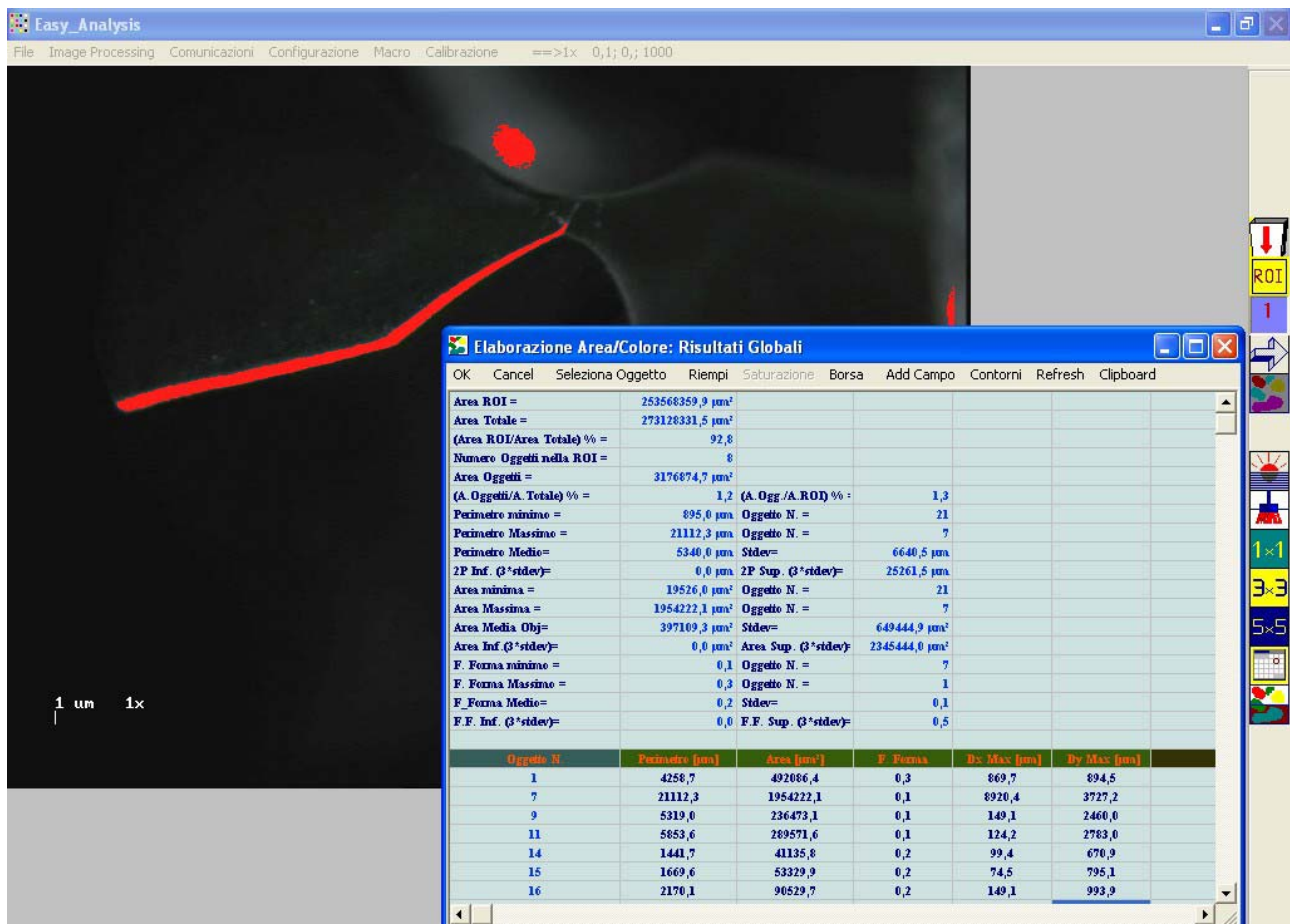


Fig. 4.7.c – Definizione area minima e eliminazione aree in eccesso

4.4.5.2. Misura della delaminazione

Mentre il posizionamento della punta viene eseguito tramite l'attrezzatura descritta in precedenza, il posizionamento dei provini per la misurazione della delaminazione si effettua semplicemente appoggiandoli sotto all'obiettivo del microscopio su due barrette in acciaio inossidabile rettificate. In questo modo è semplice spostare il provino in modo da far rientrare il foro da analizzare nel campo visivo del microscopio.

L'acquisizione dell'immagine si effettua analogamente al caso precedente. Si seleziona l'ingrandimento necessario, 1x in questo caso, e si effettua la messa a fuoco con il microscopio utilizzando la visione live di EasyView. Fatto ciò si seleziona l'opportuna calibrazione dal menu "configurazione → scegli obiettivo → 1x" e si acquisisce l'immagine. Adesso si può direttamente procedere alla misura oppure salvare l'immagine e continuare con le acquisizioni; le misurazioni si possono poi eseguire successivamente richiamando le immagini salvate in moda da diminuire notevolmente i tempi.

Nel caso della delaminazione si deve quantificare l'area interessata dal danneggiamento ($A_{misurata}$ in fig. 4.3): la selezione di tale area non è però possibile tramite la binarizzazione dell'immagine a

causa dello scarso contrasto. L'area danneggiata è comunque ben visibile e l'operatore può effettuare la selezione tramite la funzione "selezione libera" disponibile solo nella ultima versione di EasyView rilasciata in beta test. Questa funzione permette di effettuare una selezione con il puntatore del mouse disegnando il contorno dell'area interessata, dopodiché si legge la misura nel report "*elaborazione area/colore*" dove alla voce "area oggetti" corrisponde l'area misurata per calcolare l'indice I_{medio} definito dall'espressione (4.1).

La selezione così effettuata non può essere automatizzata e dipende dalla sensibilità dell'operatore, ma fornisce una sufficiente indicazione sulla delaminazione per gli obiettivi di questo lavoro di tesi. Volendo fare un paragone questo metodo di misura è analogo a quello che si effettuerebbe sovrapponendo un foglio di carta con una griglia millimetrata per poi andare a contare le caselle appartenenti all'area danneggiata; in entrambi i casi la quantificazione dell'area è soggetta alla valutazione dell'operatore ma nel caso di selezione libera con EasyView su un'immagine acquisita al microscopio la precisione è nettamente superiore.

Per facilitare la fase di selezione da parte dell'operatore è stata acquistata una tavoletta grafica Wacom Intuos3 da utilizzare in sostituzione del comune mouse. Così facendo si aumenta la precisione e la sensibilità con cui l'operatore muove il cursore sull'immagine nell'eseguire la selezione libera: si ha inoltre un miglioramento dell'ergonomia, utile per non affaticare l'operatore e consentirgli numerose misurazioni consecutive.

Nella tabella seguente sono riepilogati i posizionamenti e ed i parametri utilizzati durante l'acquisizione e l'elaborazione delle immagini per la misura dell'usura utensile. Tale tabella sarà utile in futuro per ripetere tali misure e poterle così confrontare con i risultati attuali senza variare le condizioni di prova.

	Parametro	Misura usura	Misura delaminazione
Posizionamento punta	β	-30°	Posizionamento eseguito su barrette retificate
	α	-45°	
	x	-1,87mm	
	y	3mm	
	z	27mm	
	Sagoma di posizionamento	Sagoma_riferimento_8mm.jpg	-
Impostazione microscopio	Ingrandimento microscopio	2x	1x
	illuminatore	Anulare a led	Anulare a led
	intensità	max	max
Impostazione fotocamera	Focale fotocamera	20.7mm (max)	20.7mm (max)
	Sensibilità ISO	50	50
	Diaframma	f/7.1	f/7.1
	Tempo di scatto	1/100s	1/50s
Parametri selezione	Colore	250, 250, 250	manuale
	Soglia di binarizzazione	185	
	Area minima	0.001mm ²	0.001mm ²

Tab. 4.1 – Tabella riepilogativa dei parametri utilizzati nella misurazione di usura e delaminazione

È stata analizzata la sensibilità che hanno le due misure (usura e delaminazione) alle variazioni di posizionamento di utensile e provino sotto al microscopio. Questo serve per valutare la robustezza del metodo di misura ai “disturbi” dovuti al cattivo posizionamento. Infatti per quanto precisa possa essere l’attrezzatura portapunta si potrebbero realizzare posizionamenti differenti tra le varie misurazioni e quindi portare a misure completamente falsate e non confrontabili tra loro. È stata perciò ripetuta più volte la misurazione della area usurata della stessa punta smontandola e rimontandola sull’attrezzatura. La misurazione è stata ripetuta, per 10 volte, effettuandola sia su una punta con usura appena accennata (dopo 1 foro) sia su una con ampia usura (dopo 6 fori) per validare la procedura in qualsiasi condizione di usura. In tabella (fig. 4.8) sono riportate le misure effettuate, la misura media, e gli scostamenti assoluti e percentuali da questa. Si può notare che, in entrambi i casi, la variazione rilevata non risulta mai superiore a +/-2% rispetto al valore medio misurato.

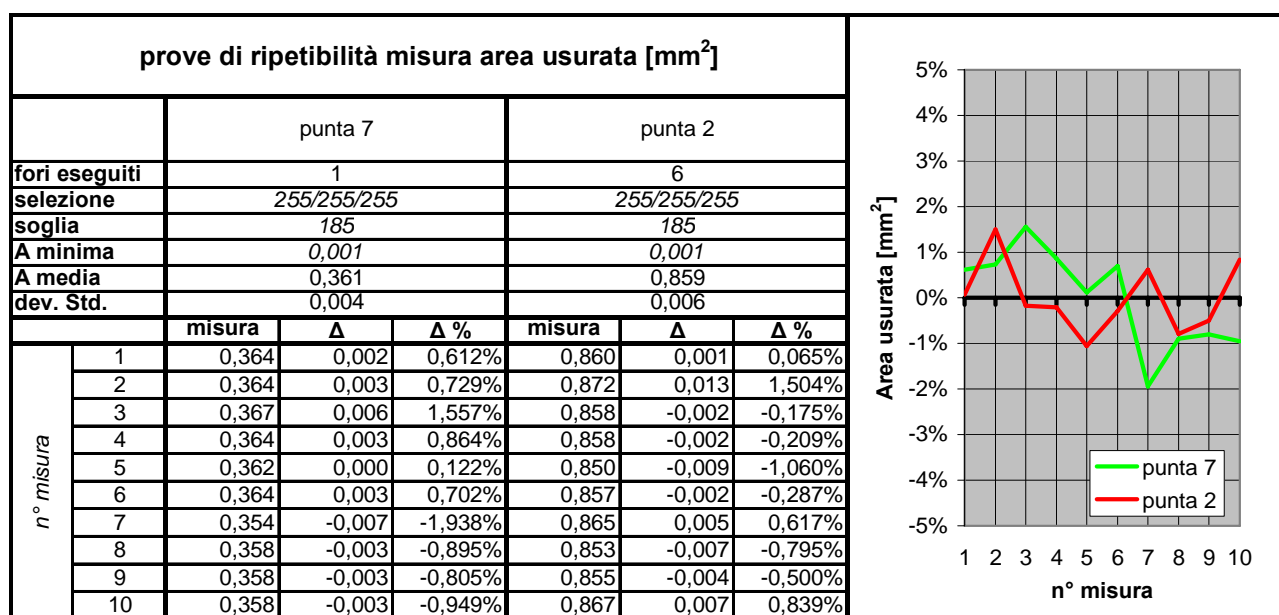


Fig. 4.8 – Variazione misura area usurata su 10 misurazioni

Per quanto riguarda la misura della delaminazione si presenta invece un altro problema. Quello che stavolta può turbare le misurazioni è il diverso posizionamento angolare del foro: non essendo la visione della fotocamera stereoscopica, come quella che si ha agli oculari, questa ha una prospettiva leggermente deviata anche se il foro risulta essere coassiale all'asse ottico del microscopio. Quindi una differente orientazione angolare potrebbe amplificare o ridurre delle zone danneggiate. Sono state perciò effettuate varie misurazioni della stessa area danneggiata variando la posizione angolare del foro riscontrando una variazione inferiore al 5% rispetto al valore medio. Si è ritenuto tale valore accettabile in quanto dello stesso ordine, se non inferiore, a quello che commette l'operatore nella selezione dell'area danneggiata.

4.5. L'illuminatore episcopico coassiale

Anche se la misurazione della delaminazione effettuata tramite selezione libera è più che soddisfacente per gli scopi di questa tesi è stato acquistato un illuminatore episcopico coassiale per il microscopio che permetterà la selezione dell'area danneggiata tramite binarizzazione dell'immagine.

L'illuminatore episcopico coassiale è un modulo aggiuntivo da inserire tra oculari ed obiettivo che realizza un'illuminazione coassiale all'asse ottico facendo passare la luce proveniente da due fibre ottiche attraverso le lenti stesse. L'illuminazione derivante non è diffusa, come quella fornita dall'illuminatore anulare a LED, ed è grazie a questo che si riesce ad identificare la zona danneggiata intorno al foro. La luce infatti è parallela all'asse ottico e viene riflessa nella stessa

direzione solo dalle superfici perpendicolari all'asse ottico stesso: tutte le altre superfici con inclinazione diversa riflettono la luce in direzioni diverse dall'asse ottico risultando non illuminate. Le zone corrispondenti all'area danneggiata dalla foratura (B) essendo rialzate rispetto alla superficie del provino rifletteranno la luce in direzioni diverse dall'asse ottico e perciò risulterà illuminata solo la superficie non interessata dal danneggiamento(A): il contrasto tra le due zone è inoltre amplificato da un filtro polarizzatore montato sull'obiettivo (figg. 4.9 e 4.10).

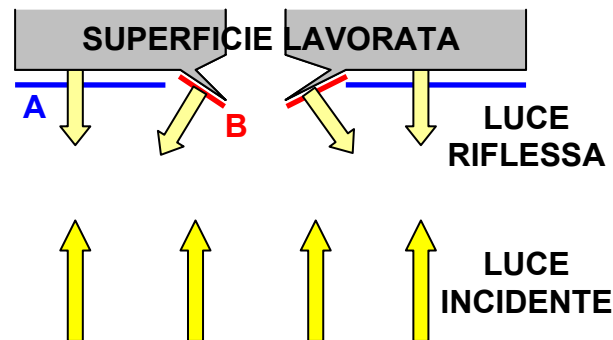


Fig. 4.9 – Illuminazione del foro da analizzare. La zona danneggiata (B) riflette la luce in direzione diversa da quella dell'asse ottico, quindi risulta più scura della zona (A) non danneggiata

In figura 4.10 è inoltre possibile effettuare un confronto tra le immagini dello stesso foro acquisite tramite il microscopio Nikon SMZ dotato di illuminatore anulare a LED (A) o di illuminatore episcopico coassiale (B).

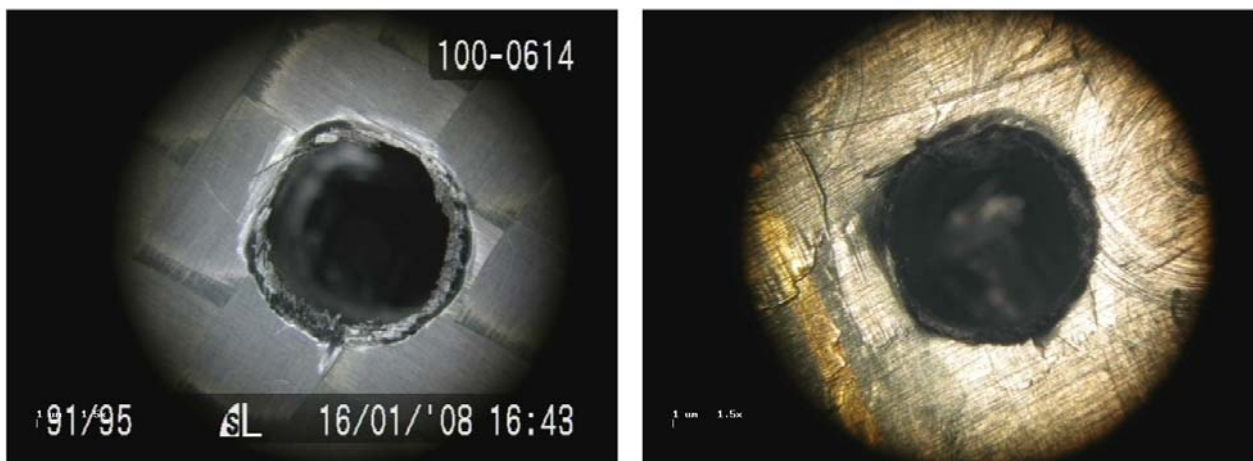


Fig. 4.10 – Immagini dello stesso foro acquisite con il Nikon SMZ 800 dotato di illuminatore anulare (a) od illuminatore episcopico con polarizzatore (b)

Con questo tipo di illuminazione è pertanto possibile, tramite la scelta di un'opportuna soglia, la binarizzazione dell'immagine e quindi la selezione della zona danneggiata in modo automatico; si

lascia all'operatore il solo compito di selezionare la soglia e di rifinire la selezione eliminando eventuali aree estranee.



Fig. 4.11 – Selezione della zona danneggiata tramite soglia di binarizzazione

Non è stato però possibile utilizzare questo metodo immediatamente in questo lavoro di tesi in quanto il suddetto illuminatore realizza anche un ulteriore ingrandimento di 1.5x e quindi, in abbinamento all'obiettivo 1x di cui è dotato il Nikon SMZ800 in origine, non consente più di analizzare la zona danneggiata di un foro di 8mm di diametro portandola all'esterno del campo visivo. Le fotografie delle figg. 4.10-4.11 sono infatti state realizzate su un foro di 5mm di diametro al solo scopo di evidenziare le possibilità di questo tipo di illuminazione. È stato perciò messo in ordine un obiettivo 0.5x da sostituire a quello 1x in dotazione che, ampliando ulteriormente il campo visivo, consentirà di analizzare fori di diametro superiore nei lavori futuri.

5. PROVE SPERIMENTALI DI FORATURA

5.1. Premessa

La parte centrale dell'analisi del processo di foratura su CFRP svolta durante questo lavoro di consta di due serie di prove: la prima per validare il laboratorio multisensoriale e la seconda per comprendere il processo ed i parametri che lo regolano. Nel presente capitolo viene descritta la campagna di prove, le modalità con cui queste sono state eseguite e sono discussi i risultati ottenuti.

5.2. Materiali utilizzati

Le prove di foratura sono state condotte su provini in di CFRP a matrice epossidica e rinforzo in fibra di carbonio. Sono ottenuti dalla sovrapposizione di lamine in fibra T700 ($E=294$ Gpa, $\sigma_R=4900$ Mpa) disposte a tessuto. Le caratteristiche della singola lamina possono essere così riassunte:

- Tessuto twill 2x2, 12k (12000 fibre per cordone)
- Matrice ACG MTM49
- Gramatura tessuto: 600g/m^2
- Spessore strato preimpregnato: 0.62mm

Ogni provino viene formato singolarmente utilizzando la tecnica del sacco a vuoto in autoclave. Ognuno di questi ha forma rettangolare (110x120mm) ed è ottenuto mediante la sovrapposizione di 13 strati di preimpregnato per uno spessore nominale finito di $8\text{mm} \pm 0.1$.

Il processo produttivo, tipico dei materiali preimpregnati, viene eseguito interamente a mano a causa della delicatezza dei materiali e della complessità delle operazioni comportando perciò un costo per ciascun provino piuttosto elevato.

Gli utensili utilizzati sono tradizionali punte elicoidali (diametro 8mm, $\eta=118^\circ$, $\phi=20^\circ$) con nocciolo scaricato, in acciaio super rapido (HSS); la scelta di lavorare materiali fortemente abrasivi con punte in HSS è stata motivata dalla necessità di ridurre al minimo la durata ed i costi delle prove anche se le punte in HSS non sono le più adeguate per questo genere di compositi a causa della loro bassa resistenza all'usura.

In questo modo si è cercato di produrre immediatamente sull'utensile un'usura apprezzabile per poter quindi osservare la variazione delle diverse grandezze con il progredire del numero dei fori.

5.3. Classificazione ed archiviazione delle prove

Tutte le prove eseguite in questo lavoro di tesi sono state classificate in un apposito file Excel nel quale si possono trovare i riferimenti per rintracciare le immagini acquisite ed i dati registrati dai sensori del laboratorio.

Per eseguire una classificazione univoca ogni punta ha un numero progressivo: è stato inoltre assegnato un numero progressivo per ciascun foro eseguito dalla punta. Per esempio i dati che sono classificati con la dicitura “*punta_02_foro03*” corrispondono a quelli della punta n°2 ed il terzo foro.

5.4. La validazione del laboratorio

5.4.1. Foratura di prova su CFRP

Per testare il funzionamento dell'insieme macchina-sensori-PC, è stata eseguita una serie di prove con utensile in HSS su un provino in CFRP identico a quelli che verranno utilizzati nella successiva campagna di indagine. Da queste non è stata evidenziato alcun malfunzionamento da parte della macchina e del sistema sensori-personal computer.

È stato ricavato il seguente grafico che riporta l'andamento della forza di penetrazione F_x in funzione dello spessore forato (fig. 5.1): tale andamento è tipico della lavorazione di foratura con punta elicoidale ed è diviso in diverse zone in base alla posizione dell'utensile in presa.

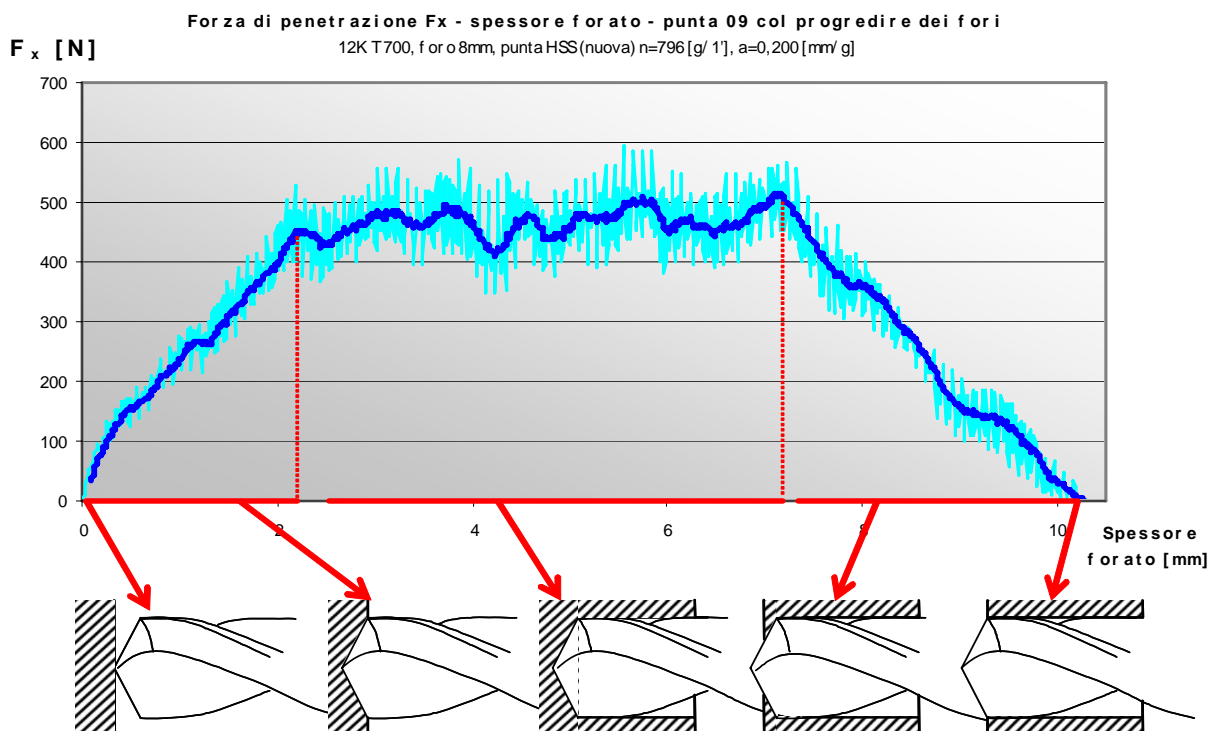


Fig. 5.1 – Andamento della forza di penetrazione nella lavorazione di foratura con punta elicoidale
(valore registrato in azzurro, media mobile su 10 misure in blu)

Nella fig. 5.1 è rappresentato in azzurro l'andamento della F_x registrato dai sensori, mentre in blu è rappresentata la media mobile della F_x calcolata su 10 valori per eliminare dalla rappresentazione le oscillazioni a più alta frequenza: in seguito nei diagrammi di questo tipo verranno sempre proposti gli andamenti della sola media mobile per una permetterne una migliore leggibilità.

Analizzando l'andamento riportato in fig. 5.1 si notano diverse zone, dovute alla particolare geometria della punta, ciascuna con un proprio andamento caratteristico della forza di penetrazione:

- Inizio contatto nocciolo → rapido innalzamento F_x
- Inserimento cono → aumento F_x dovuto all'aumento del tagliente in presa
- Foratura con utensile completamente in presa → F_x più meno costante
- Inizio uscita cono → F_x decrescente dovuta alla diminuzione del tagliente in presa
- Fuoriuscita spigolo → cessazione F_x (possibile F_x residua dovuta alla natura capacitiva del sensore)

Questi test iniziali hanno permesso di evidenziare un inconveniente dovuto alla scelta del trigger, che avrebbe potuto falsare l'intera campagna di prove.

Il trigger è il segnale in ingresso alla scheda di acquisizione che viene utilizzato da parte del software LabView per avviare la registrazione dei dati dai sensori; deve essere settata una soglia per cui solo valori superiori a questa facciano avviare la registrazione. In queste prove viene utilizzato il segnale proveniente dalla piattaforma dinamometrica che identifica la forza di penetrazione F_x ; il valore precedentemente scelto come soglia (150 N), essendo troppo elevato, non consentiva di registrare la parte iniziale del processo di foratura perdendo gran parte dei dati e falsando completamente l'andamento della forza di penetrazione (e di tutte le altre grandezze monitorate).

Ciò è risultato palese dal confronto tra gli andamenti della forza di penetrazione F_x registrata in quattro forature differenti. Infatti il grafico (fig. 5.2) del primo foro, con punta nuova e forza F_x limitata, terminava con molto anticipo rispetto al previsto: con un spessore da forare di 8 mm e circa 3.4mm di cono per la punta da 8mm il diagramma sarebbe dovuto terminare poco oltre gli 11mm anziché intorno ai 9mm come rilevato. È successo questo in quanto la soglia impostata era dello stesso ordine di grandezza della F_x a regime e la registrazione è stata avviata soltanto al termine della zona di ingresso della punta perdendo i millimetri iniziali della foratura.

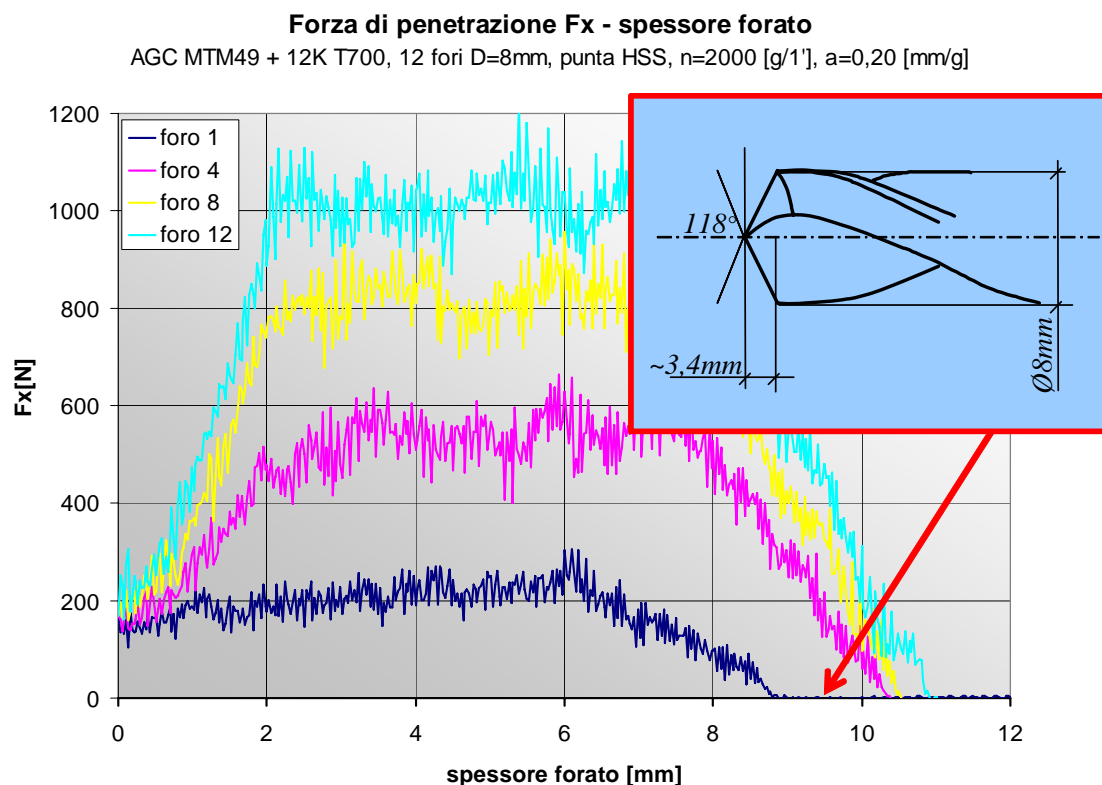


Fig. 5.2 – Errore durante la registrazione della forza di penetrazione dovuto alla selezione di una soglia troppo alta per il segnale di trigger. In alto il riferimento alla geometria della punta utilizzata.

È stato perciò settato il trigger al minimo valore possibile (15 N): con tale impostazione la registrazione si avvia immediatamente, in quanto la bassa soglia viene superata dalla forza inerziale dovuta allo spostamento del carrello della macchina utensile. L'operatore dovrà perciò, durante la fase di elaborazione dati, eliminare manualmente quelli in eccesso.

È quindi da valutare per i futuri sviluppi la possibilità di mettere in comunicazione il sistema di posizionamento della macchina utensile con quello di monitoraggio per una perfetta rilevazione dell'istante di contatto utensile/pezzo.

5.4.2. Prove di ripetibilità.

Per garantire una buona riuscita delle prove effettuate ed assicurare la validità dei risultati ottenuti minimizzando allo stesso tempo il numero delle prove sono state inizialmente eseguite alcune prove di ripetibilità. È stata verificata l'intera procedura di prova ripetendo per tre volte la stessa prova di foratura fissando tutti i parametri. È stata infatti eseguita la foratura con parametri di taglio fissi di 3 serie da 6 fori partendo in ciascuna con punta nuova. Per ciascun foro è stata registrata la F_x e misurata sia l'usura dell'utensile che la delaminazione procurata. I risultati rappresentati in grafici nella fig. 5.3 mostrano chiaramente come i dati rilevati durante le tre prove abbiano una dispersione

contenuta come si poteva immaginare vista l'elevata rigidità del complesso macchina/attrezzatura e e l'accuratezza della procedura di misura descritta nel precedente capitolo.

Nella tab. 5.1 sono invece riportati i dati relativi ai grafici in fig. 5.3.

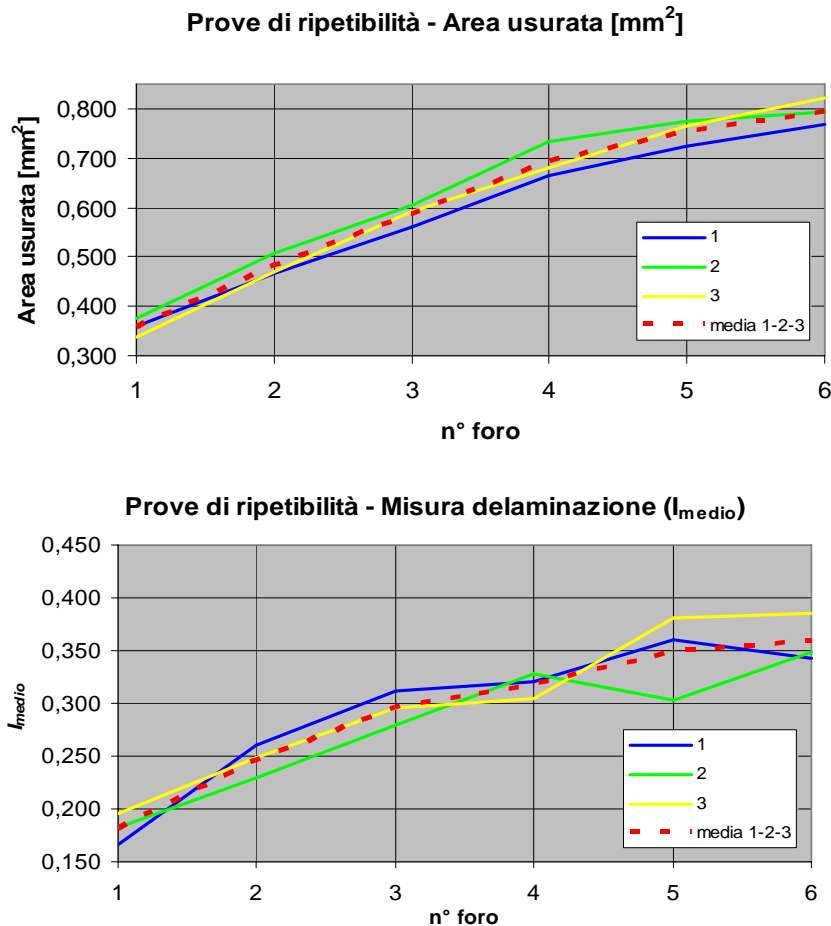


Fig. 5.3 – Andamento di usura e delaminazione nelle 3 prove eseguite

Prove di ripetibilità misurazioni												
		n° punta										
		1			2			3			media 1-2-3	
		area misurata [mm²]	I_medio	area usurata [mm²]	area misurata [mm²]	I_medio	area usurata [mm²]	area misurata [mm²]	I_medio	area usurata [mm²]	I_medio	area usurata [mm²]
n° foro	1	66,921	0,166	0,359	68,608	0,182	0,376	69,997	0,196	0,339	0,181	0,239
	2	76,474	0,261	0,468	73,304	0,229	0,508	75,289	0,249	0,471	0,246	0,322
	3	81,668	0,312	0,560	78,370	0,280	0,605	79,924	0,295	0,593	0,296	0,395
	4	82,567	0,321	0,665	83,190	0,328	0,734	80,910	0,305	0,681	0,318	0,435
	5	86,442	0,360	0,723	80,714	0,303	0,775	88,520	0,381	0,764	0,348	0,498
	6	84,689	0,342	0,769	85,262	0,348	0,792	88,995	0,385	0,821	0,359	0,522

Tab. 5.1 – Tabella riepilogativa dei risultati della prova di ripetibilità del processo

5.5. Prove sperimentali su CFRP

Per la scelta dei parametri di taglio si è fatto inizialmente riferimento ai valori consigliati dalla ditta Sandvik-Dormer per l'impiego di punte in HSS ($D=8\text{mm}$) su CFRP. Vista l'elevata natura abrasiva del materiale viene proposto l'uso di basse velocità di taglio ($V_t=10\text{m/min}$) ed avanzamenti (a) compresi tra $0.1-0.15\text{mm/giro}$.

Effettuata la prima serie di 6 fori consecutivi utilizzando tali parametri ($V_t=10\text{m/min}$, $a=0.125\text{mm/giro}$) si evidenzia un danneggiamento sul materiale assai elevato pur con un tasso di usura relativamente contenuto.

Si nota, osservando le superfici al microscopio, come la velocità di taglio fosse insufficiente a generare un taglio netto e ben definito. Sembra infatti che l'utensile sia penetrato nel materiale disgregandone l'integrità più che per asportazione di truciolo. Si è perciò proseguito i test incrementando la velocità di taglio (rispettivamente a 25, 50 e 75 m/min) e mantenendo invariato l'avanzamento. Il risultato di tali test è riportato in fig. 5.4.a-c.

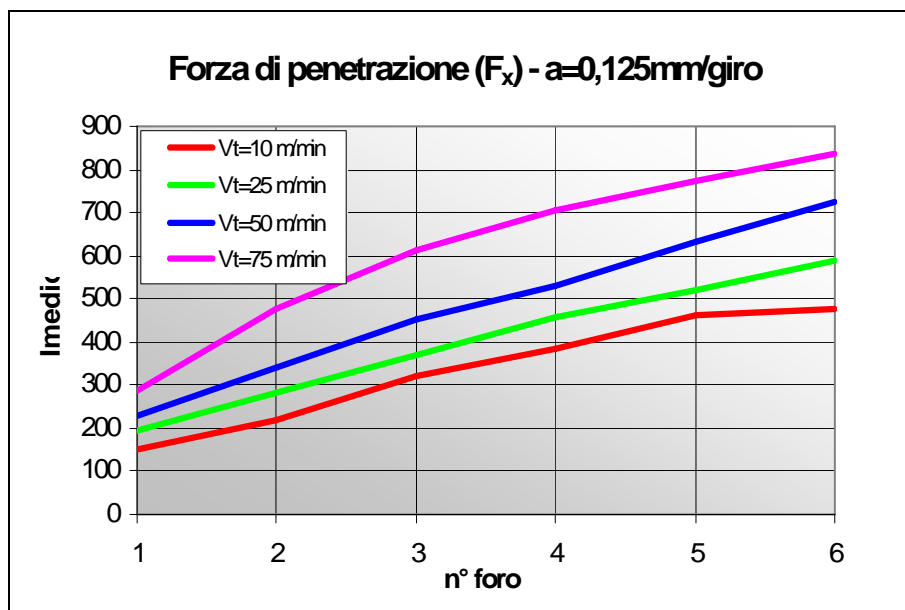


Fig. 5.4.a – Variazione di forza di penetrazione in funzione di V_t

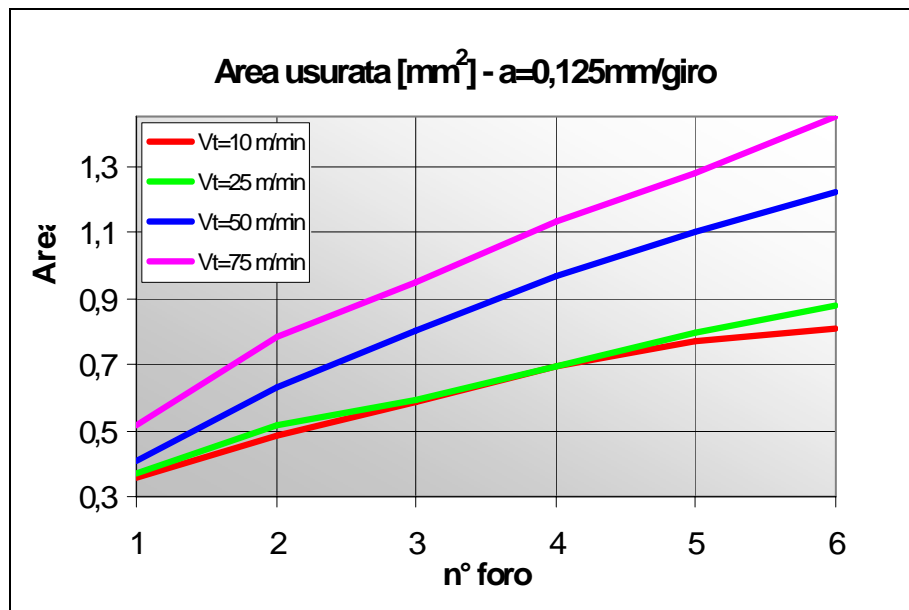


Fig. 5.4.b – Variazione dell'usura usura in funzione di V_t

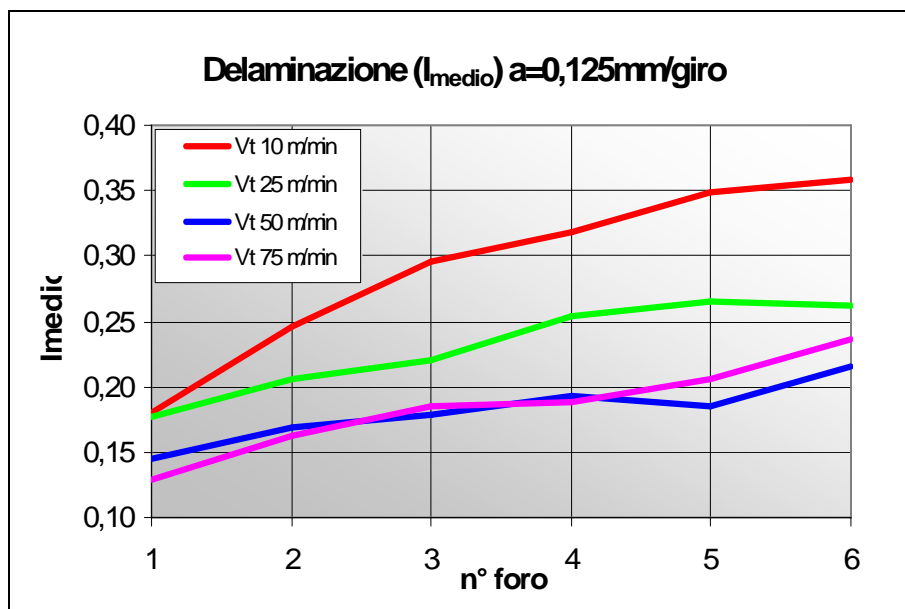


Fig. 5.4.c – Variazione della delaminazione in funzione di V_t

Si è così riscontrata, contrariamente a quanto riportato in letteratura, una apprezzabile influenza della velocità di taglio, rilevando all'aumentare di questa (fig. 5.4) un incremento significativo della forza di penetrazione. In corrispondenza di tale aumento si rileva un altrettanto notevole incremento dell'usura. La ragione di un simile aumento può essere spiegata considerando che l'incremento di velocità di taglio causa, per degrado termico, un'usura marcata sull'utensile modificandone la geometria e originando forze di penetrazione superiori.

In corrispondenza dell'incremento della forza di penetrazione F_x si rileva, ancora in controtendenza con la letteratura, una riduzione della delaminazione: per spiegare tale fenomeno si è ipotizzato che

elevate V_t contribuiscano a migliorare l'azione di una punta già usurata sfruttando la maggior frequenza con la quale i taglienti urtano i fasci di fibre appartenenti agli ultimi strati.

5.6. La campagna di prova

Appurata la non secondaria influenza della velocità di taglio (V_t) per questa combinazione utensile pezzo, sono state realizzate altre prove per evidenziare gli effetti combinati di V_t ed avanzamento (a) e determinare i parametri di taglio ottimali dal punto di vista della qualità del foro realizzato. Per ogni combinazione V_t - a è stata utilizzata una punta nuova in modo tale da separare l'effetto dell'usura.

La seconda campagna di prove è stata perciò pianificata in base alla matrice riportata in fig. 5.5, all'interno di questa sono indicate le possibili combinazioni V_t - a utilizzate. Ogni elemento della suddetta matrice rappresenta il numero utilizzato per classificare (secondo quanto spiegato nel par. 5.3) la punta utilizzata.

n. punta		velocità di taglio [$m/1'$] (numero di giri [giri/min])									
		20	796	30	1194	40	1592	50	1990	60	2388
avanzamento [mm/giro]	0,10	7		11		15		19		27	
	0,15	8		12		16		20		28	
	0,20	9		13		17		21		29	
	0,25	10		14		18		22		30	
	0,30	23		24		25		26		31	

Fig. 5.5 – Tabella riepilogativa della campagna di prove. Ciascun elemento rappresenta il numero di classificazione della punta utilizzata

Per ciascuna delle suddette combinazioni è stato eseguito un singolo foro rilevando on-line le azioni di taglio e misurando successivamente l'usura della punta ed il danneggiamento procurato al provino. Per quanto riguarda le azioni di taglio, in particolare, è stata considerata la forza di penetrazione F_x che assume nello spessore un andamento caratteristico come quello riportato in fig. 5.1. Si riporta nelle figg. 5.6.a e 5.6.b come riepilogo della forza di penetrazione registrata, significativo per un'analisi globale, solo il valore medio calcolato nel tratto costante del diagramma cioè quando la punta ha i taglienti completamente in presa.

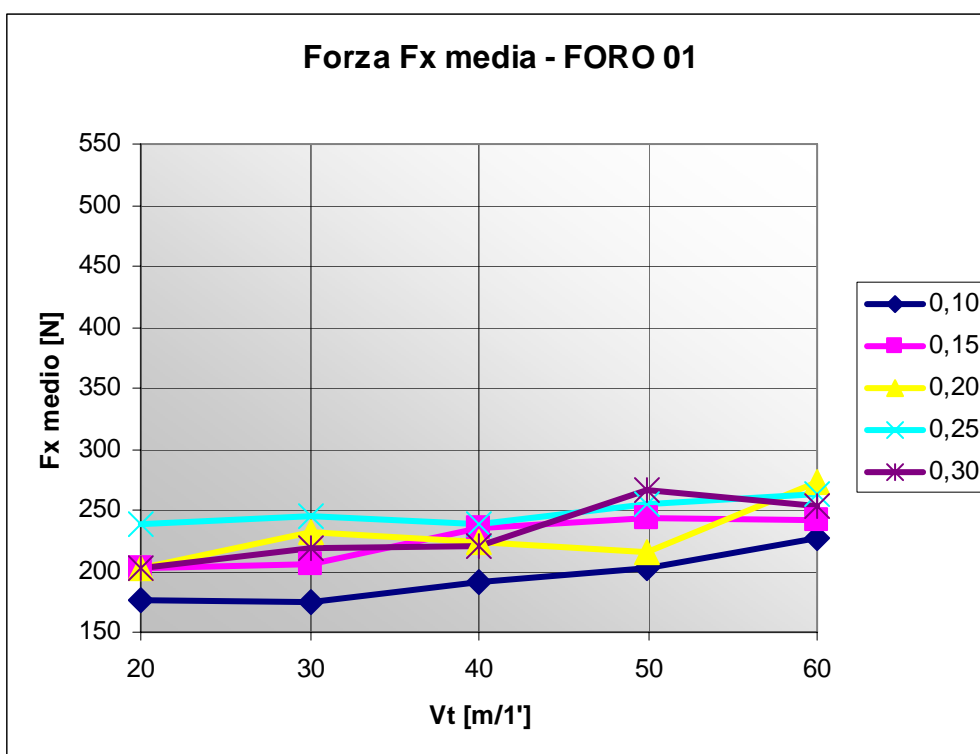


Fig. 5.6.a – Andamento della forza di penetrazione $F_{x\ media}$ (valor medio calcolato nel tratto costante) al variare della velocità di taglio e con avanzamento fissato per le varie serie da 0.1 a 0.3 mm/giro

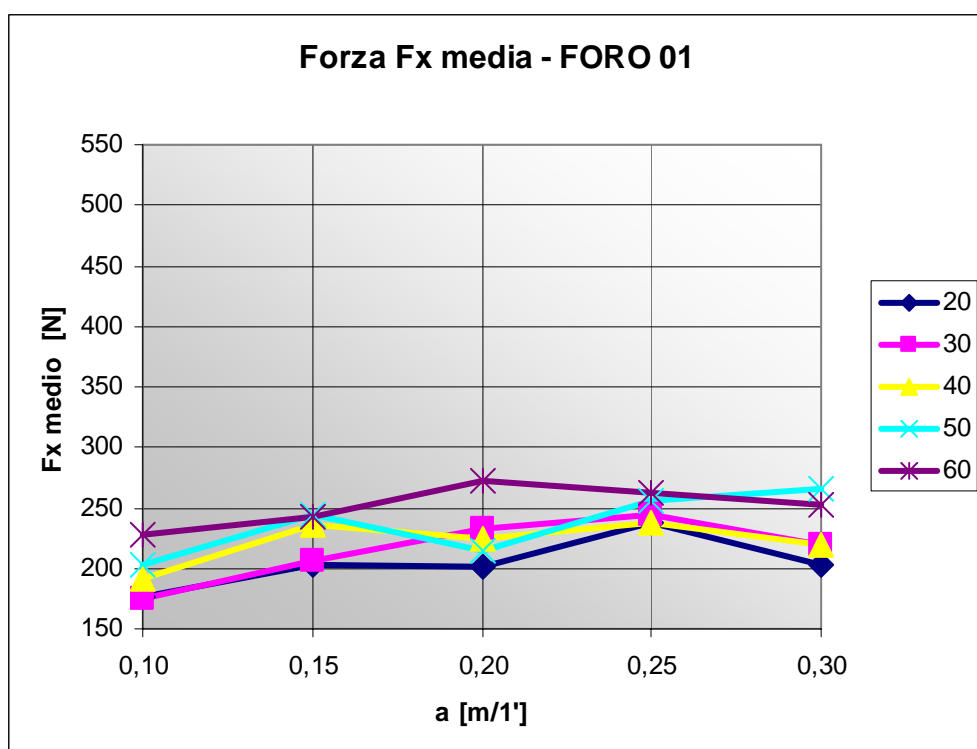


Fig. 5.6.b – Andamento della forza di penetrazione $F_{x\ media}$ (valor medio calcolato nel tratto costante) al variare dell'avanzamento e con velocità di taglio fissata per le varie serie da 20 a 60 m/min

Si evidenzia in questi diagrammi una lieve tendenza all'aumento della F_x sia all'aumentare della velocità di taglio che dell'avanzamento. Questi andamenti sono però in disaccordo con quanto appurato in letteratura dove l'incremento di velocità di taglio non ha quasi alcuna influenza sulla F_x mentre l'incremento di velocità di avanzamento comporta un rilevante aumento della F_x .

Da questi diagrammi perciò si evince, che già in corrispondenza del primo foro, quindi con punta nuova, con questa combinazione di utensile/pezzo, il valore della F_x è fortemente legato all'usura della punta più che alla variazione della velocità di avanzamento come è invece noto in letteratura. Questa affermazione può essere spiegata pensando all'effetto che ha la variazione di avanzamento sull'usura dell'utensile. Introducendo l'espressione dei metri lavorati, cioè i metri di truciolo asportati dall'utensile:

$$metri_{lavorati} = V_t \cdot \frac{sp.}{a \cdot n} = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \cdot \frac{sp.}{a \cdot n} \quad (5.1)$$

Dove $sp.$ è lo spessore forato, V_t la velocità di taglio, a la velocità di avanzamento e n il numero di giri, d il diametro del foro.

Si nota che aumentando l'avanzamento diminuiscono i metri lavorati, quindi il contatto utensile/pezzo e di conseguenza diminuisce anche l'usura arrecata all'utensile.

Perciò nel caso di utensile in HSS, quindi con scarsa resistenza all'usura, e materiale altamente abrasivo, già durante l'esecuzione del primo foro sui bassi avanzamenti, l'usura risulta sufficientemente marcata da modificare la geometria dell'utensile comportando un aumento della forza di penetrazione a valori paragonabili a quelli ottenuti a più alti avanzamenti. Per questo motivo la forza di penetrazione F_x cresce poco o addirittura rimane costante con l'incremento di avanzamento.

La stessa sensibilità della F_x all'usura della punta è evidenziata dall'andamento che ha all'aumentare della velocità di taglio; la F_x infatti cresce più del previsto in corrispondenza di una superiore usura dovuta ai valori più elevati di velocità di taglio.

Le precedenti affermazioni hanno riscontro nell'andamento dell'usura registrato al variare di velocità di taglio ed avanzamento. Come rappresentato nelle figg. 5.7.a e 5.7.b questa aumenta a seguito di un incremento della velocità di taglio e diminuisce invece con l'aumentare della velocità di avanzamento. Si nota inoltre che queste variazioni sono maggiormente apprezzabili, nel caso di questo primo foro, per i valori più elevati di velocità di taglio e per gli avanzamenti più bassi dove i suddetti effetti sono maggiori.

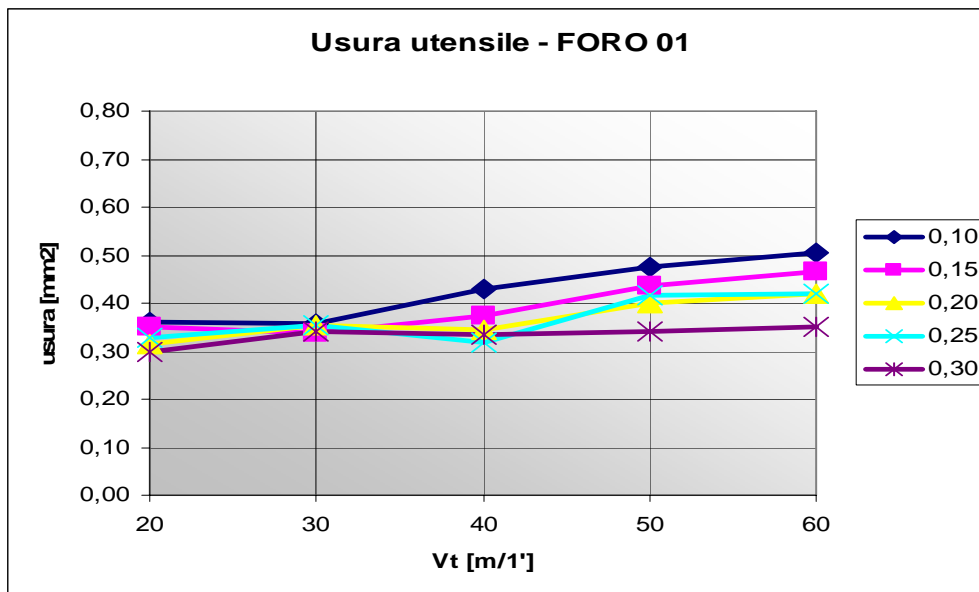


Fig. 5.7.a – Andamento dell'usura al variare della velocità di taglio e con avanzamento fissato per le varie serie da 0.1 a 0.3 mm/giro

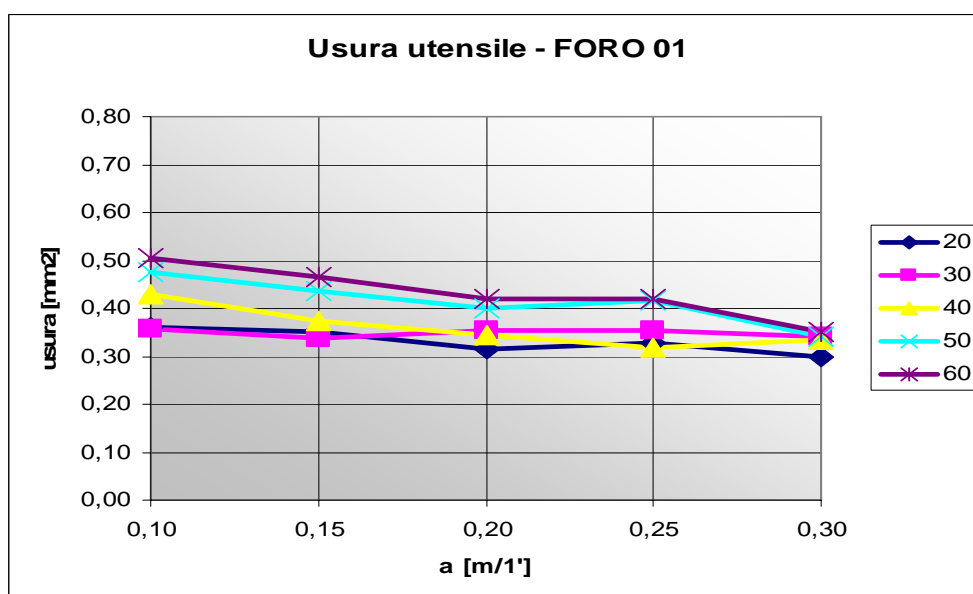


Fig. 5.7.b – Andamento dell'usura al variare dell'avanzamento e con velocità di taglio fissata per le varie serie da 20 a 60 m/min

Dai diagrammi riportati nelle figg. 5.8.a e 5.8.b si apprezza comunque che, anche in questo caso, i danneggiamenti maggiori si manifestano in corrispondenza della combinazione che prevede basse velocità di taglio ed avanzamento a conferma della forte influenza dell'avanzamento sull'usura. In controtendenza a quanto appurato in letteratura si hanno danneggiamenti generalmente inferiori per avanzamenti elevati dove la punta mantiene un'usura limitata grazie al minor periodo di contatto tra utensile e pezzo. La geometria dell'utensile viene perciò modificata in modo minore e la F_x , principale causa della delaminazione, si mantiene su livelli più bassi.

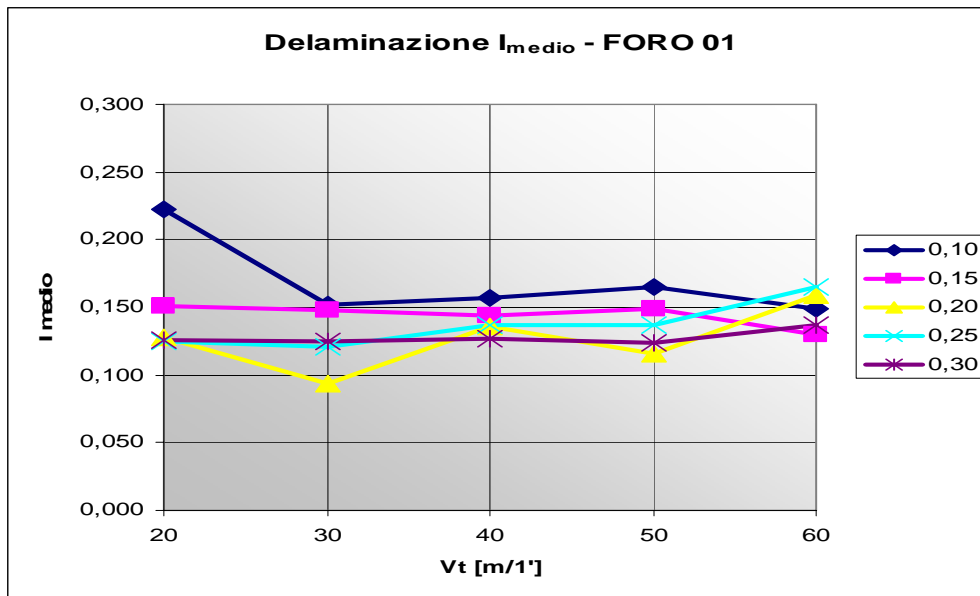


Fig. 5.7.a – Andamento della forza di penetrazione F_x al variare della velocità di taglio e con avanzamento fissato per le varie serie da 0.1 a 0.3 mm/giro

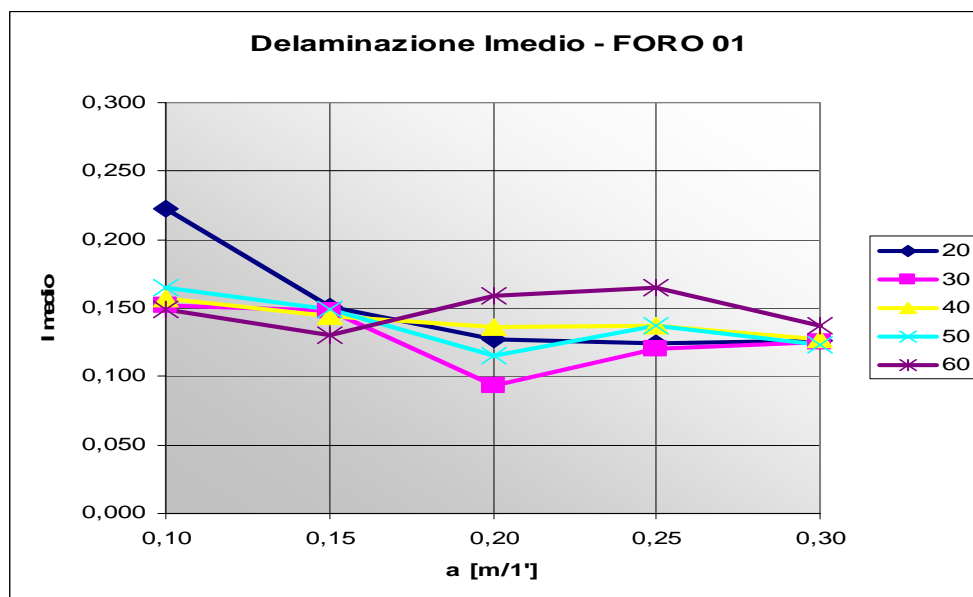


Fig. 5.7.b – Andamento della forza di penetrazione F_x al variare dell'avanzamento e con velocità di taglio fissata per le varie serie da 20 a 60 m/min

Viene successivamente analizzato l'effetto dell'usura sfruttando i medesimi utensili, associati alle rispettive combinazioni di parametri di taglio, per l'esecuzione di altri 3 fori consecutivi a quello già realizzato per un totale di 100 fori. Viene quindi eseguito il monitoraggio online delle azioni di taglio di ciascuna foratura e successivamente la misura dell'usura e del danneggiamento procurato. L'usura sul fianco, oltre a crescere all'aumentare della velocità di taglio, come evidenziato nelle figg. 5.6.a e 5.6.b, aumenta ovviamente con il progredire del numero dei fori eseguiti: con essa cresce anche la forza di penetrazione F_x . A seguito del secondo foro è stato infatti registrato un incremento globale medio della forza di penetrazione di circa il 50%, mentre nei successivi

l'incremento va diminuendo fino a circa il 20% tra terzo e quarto foro. Ciò si evidenzia anche analizzando gli andamenti della forza di penetrazione rilevata dalla piattaforma dinamometrica dei quali si riporta, nei grafici di fig. 5.8, quello relativo alle F_x per le quattro forature con combinazioni V_t - a più estreme: sono quindi la prima ed ultima della diagonale principale della matrice delle prove riportata in fig. 5.5 e rispettivamente le numero 7 e 31.

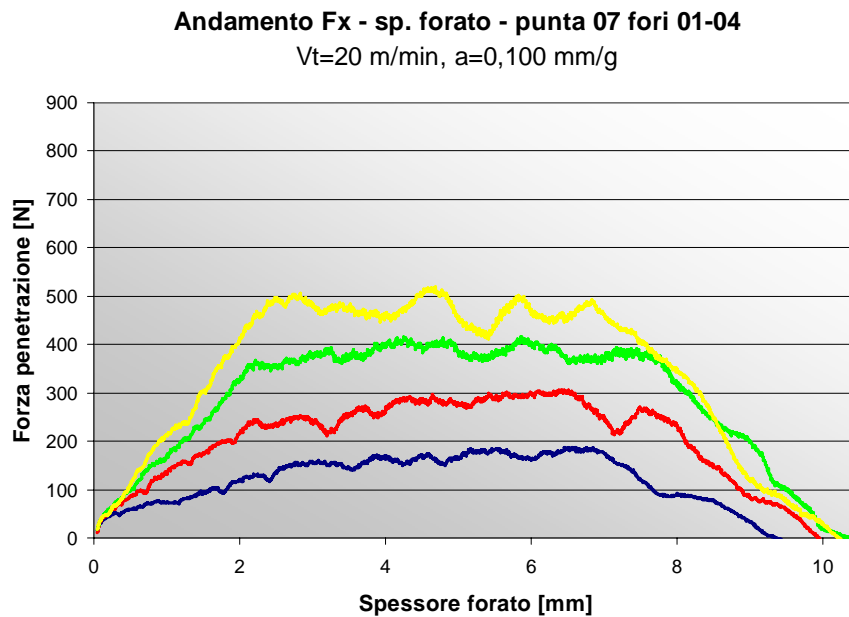


Fig. 5.8.a – Andamento della forza di penetrazione F_x nello spessore forato per la punta n.07

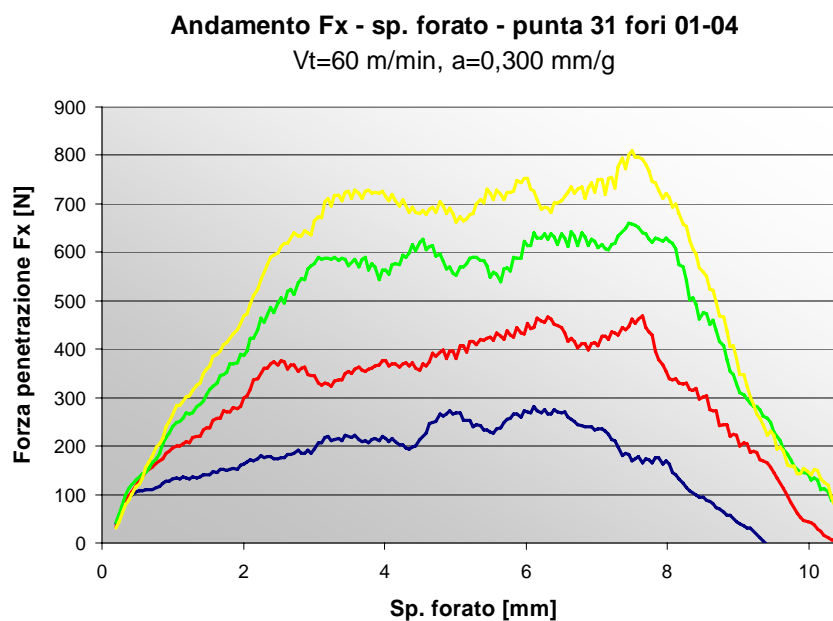


Fig. 5.8.b – Andamento della forza di penetrazione F_x nello spessore forato per la punta n.31

Anche nel caso dei fori successivi al primo è stato calcolato per ogni foratura il valore medio della forza di penetrazione F_x nell'intervallo in cui i taglienti della punta si mantengono completamente in presa e l'andamento di F_x è pressoché costante. L'andamento di tale valore medio è riportato nei diagrammi di fig. 5.9.a e 5.9.b.

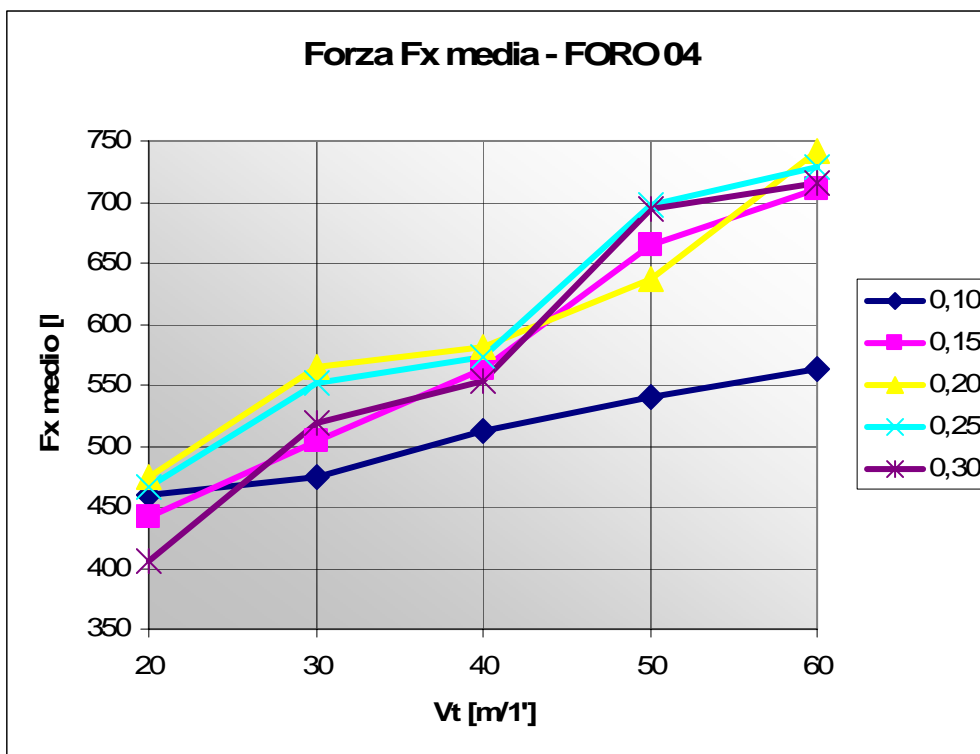


Fig. 5.9.a – Andamento della forza di penetrazione $F_{x\ media}$ (valor medio calcolato nel tratto costante) al variare della velocità di taglio e con avanzamento fissato per le varie serie da 0.1 a 0.3 mm/giro

I risultati rilevati nell'esecuzione del quarto foro mostrano in modo ancor più palese come la V_t influenzi notevolmente la forza di penetrazione, anche se indirettamente a causa dell'incremento di usura. Questo perché una maggior velocità di taglio causa una temperatura di lavoro più elevata durante il contatto utensile pezzo comportando un maggior degrado termico sia del pezzo che della punta che presenta una usura più marcata.

Se già dopo il primo foro si apprezzava l'incremento di F_x in corrispondenza ad un aumento della velocità di taglio, dopo 4 fori consecutivi questo effetto si è amplificato. Mantenendo infatti invariati i parametri di taglio per le varie punte, quei parametri che causavano un'usura superiore sono andati a produrre un'usura totale dopo 4 fori notevolmente superiore a quella manifestata su punte che hanno utilizzato parametri di taglio che generavano un'usura ridotta. Pertanto le curve al variare di V_t hanno incrementato la pendenza (fig. 5.9.a) mentre quelle al variare dell'avanzamento si sono allontanate tra loro (fig. 5.9.b).

Anche in questo caso, grazie alla minor usura riportata lavorando a valori di avanzamento più elevati, la forza di penetrazione F_x non subisce un evidente incremento all'aumentare dell'avanzamento, ma rimane pressoché costante, con variazioni inferiori al 10% del valore medio registrato ai diversi valori.

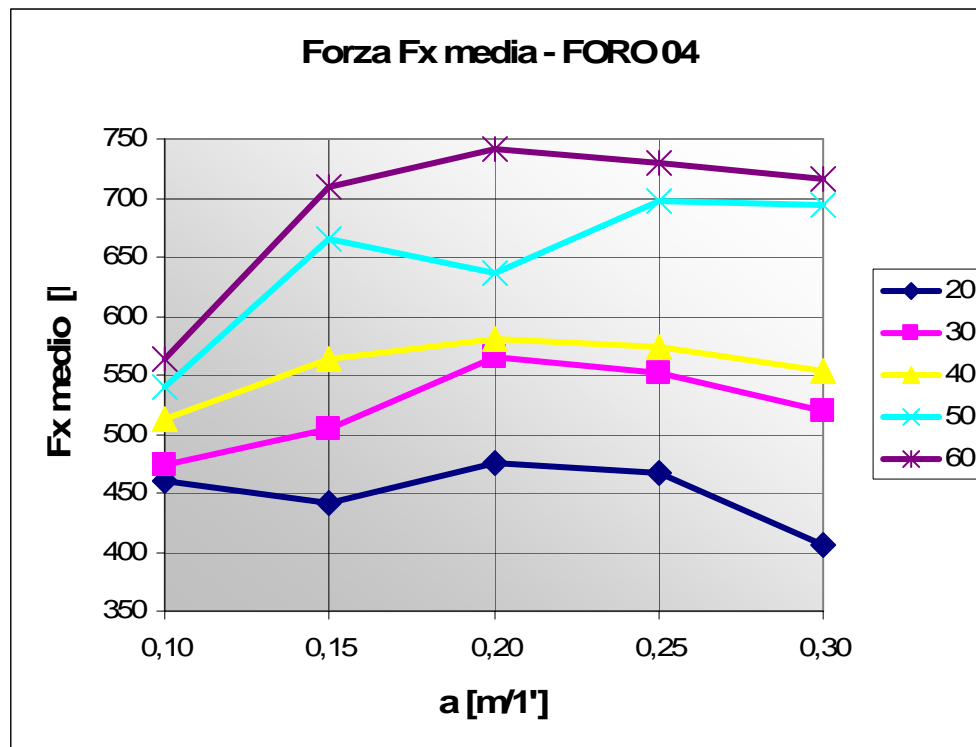


Fig. 5.9.b – Andamento della forza di penetrazione $F_{x\ media}$ (valor medio calcolato nel tratto costante) al variare dell'avanzamento e con velocità di taglio fissata per le varie serie da 20 a 60 m/min

Soltanto nel caso delle velocità di taglio più elevate (50 e 60 m/min) si ha una lieve tendenza all'aumento; ciò potrebbe essere dovuto al raggiungimento per questi utensili di un grado di usura talmente elevato da annullare l'effetto compensativo prima descritto.

L'usura, che viene riportata di seguito nei diagrammi delle figg. 5.10.a e 5.10.b, mantiene le stesse tendenze manifestate nel primo foro, quello con punta nuova: incrementa col progredire della velocità di taglio e diminuisce all'aumentare della velocità di avanzamento.

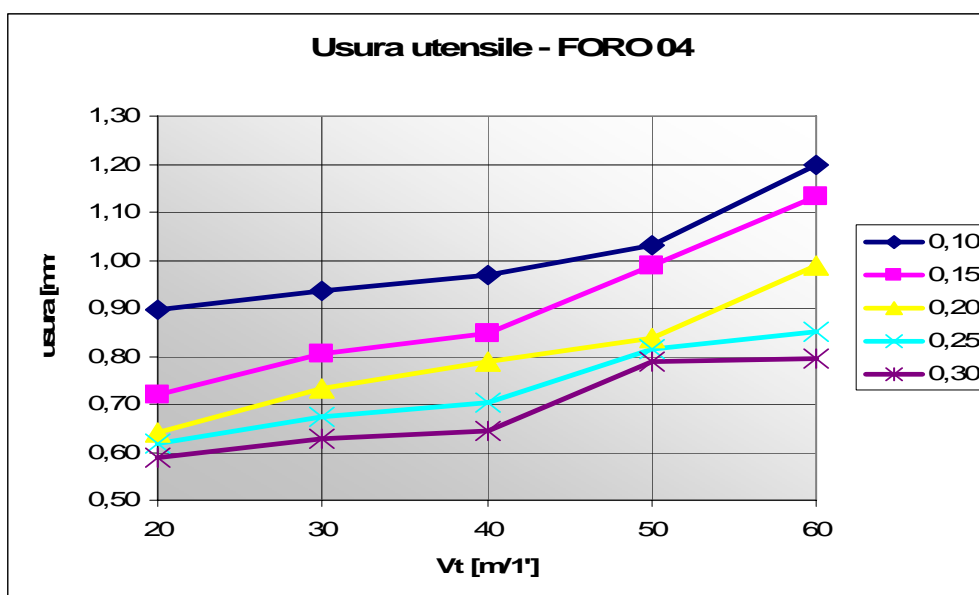


Fig. 5.10.a – Andamento dell'usura al variare della velocità di taglio e con avanzamento fissato per le varie serie da 0.1 a 0.3 mm/giro dopo il quarto foro

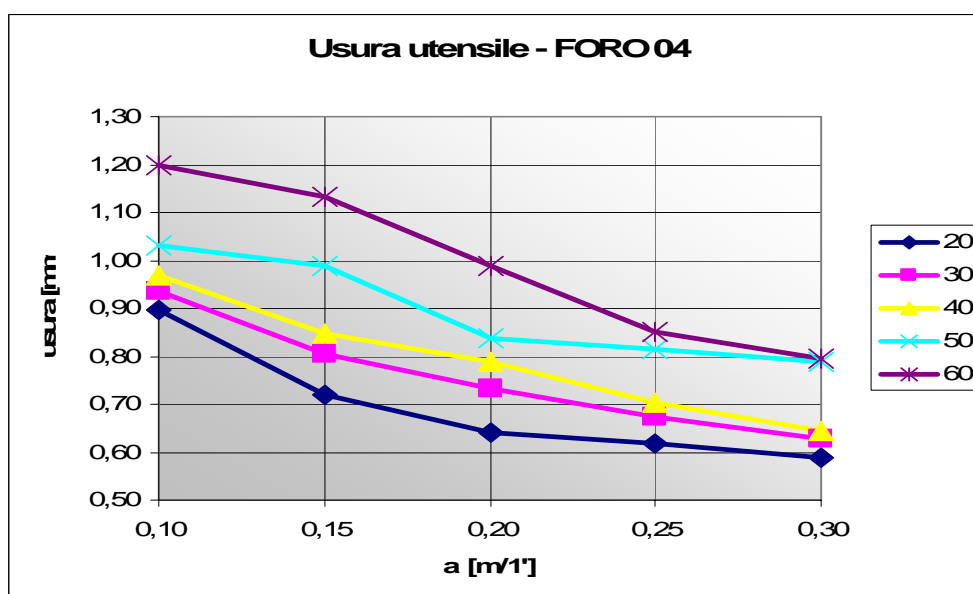


Fig. 5.10.b – Andamento dell'usura al variare dell'avanzamento e con velocità di taglio fissata per le varie serie da 20 a 60 m/min dopo il quarto foro

La delaminazione misurata presenta valori palesemente crescenti all'aumentare del numero dei fori ma è caratterizzata da una sensibile dispersione dei dati relativi allo stesso foro con parametri tecnologici differenti.

Questa anomalia delle misurazioni è dovuta ai molteplici aspetti, a volte anche casuali, che la influenzano. Inoltre, durante le misurazioni, non sempre si riesce ad apprezzare la differenza tra delaminazione effettiva, cioè con separazione delle ultime lamine del composito e taglio incompleto delle fibre senza però fratture interlaminari. Il fenomeno risulta particolarmente evidente all'aumentare dell'usura ed è ricollegabile al fatto che le fibre vengono spezzate non tanto per

l'azione dei taglienti ma per l'elevato stato di trazione generato dallo strisciamento del fianco dell'utensile. Tale ipotesi è stata formulata a seguito di un'analisi microscopica della zona danneggiata in corrispondenza della zona di uscita con punta nuova (fig 5.11.a) e usurata (5.11.b) e gli stessi parametri tecnologici.

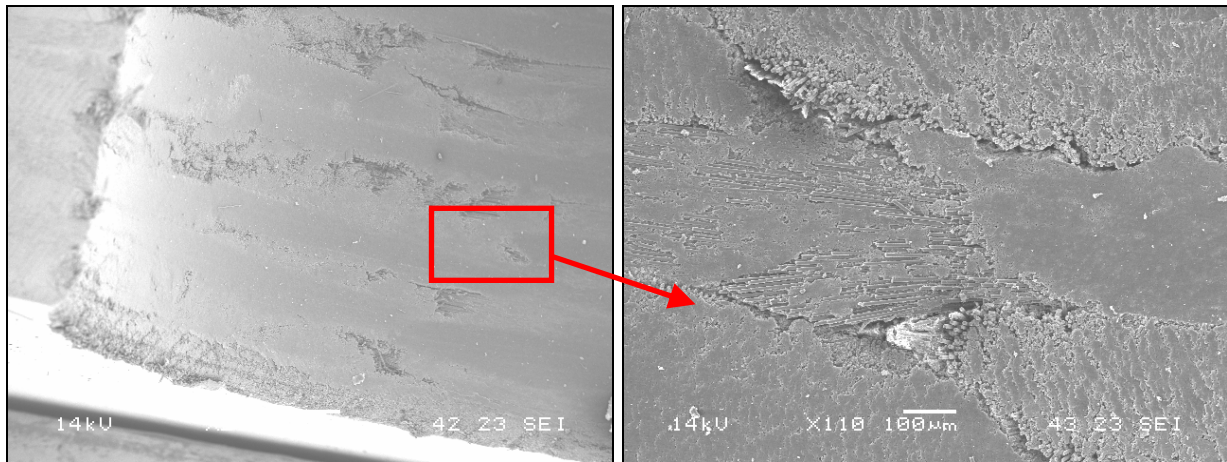


Fig. 5.11.a – Analisi microscopica della superficie del foro realizzato con punta nuova

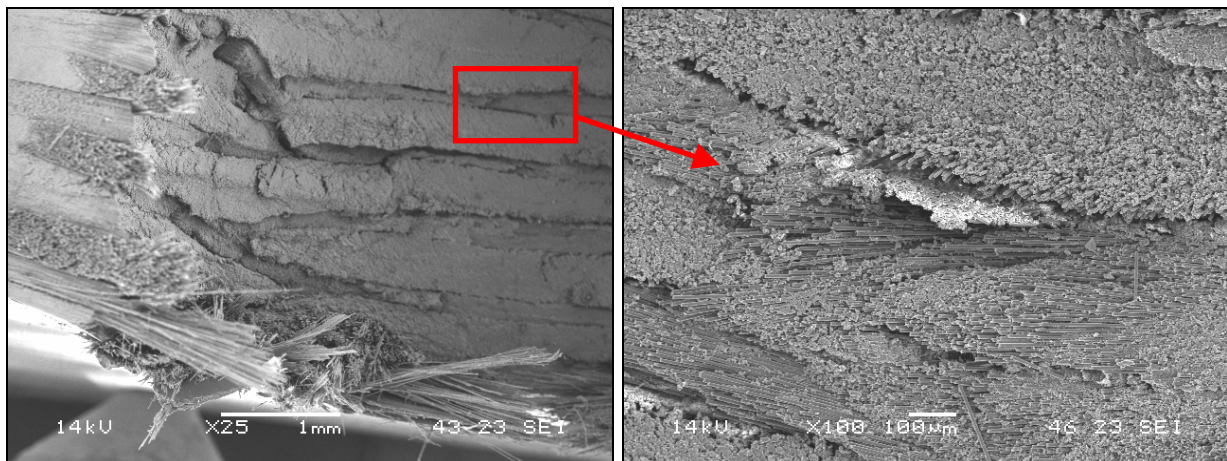


Fig. 5.11.b – Analisi microscopica della superficie del foro realizzato con punta usurata

Nel primo caso la superficie si mantiene ordinata e le fibre, completamente affogate nella matrice non affiorano dalla superficie del foro, mentre nel secondo caso la matrice viene termicamente disgregata ed i fasci di fibre, strappati per urto, restano affioranti. La presenza di fibre affioranti, se non accompagnata da frattura interlaminare, sembra essere un aspetto secondario che, pur impedendo una corretta valutazione quantitativa del danneggiamento, non compromette le caratteristiche meccaniche del laminato.

Al fine di validare i risultati appena descritti sono state ripetute fino ad un totale di tre prove con ciascuna coppia V_r-a , eseguendo due forature per ogni punta nuova. Le punte sono state classificate con il medesimo metodo utilizzando un numero progressivo che le identifica. Sono state monitorate

le azioni di taglio ed effettuate le misure di usura utensile e delaminazione procurata. I dati sono stati poi riassunti in tabelle e riportati in grafici analoghi ai precedenti.

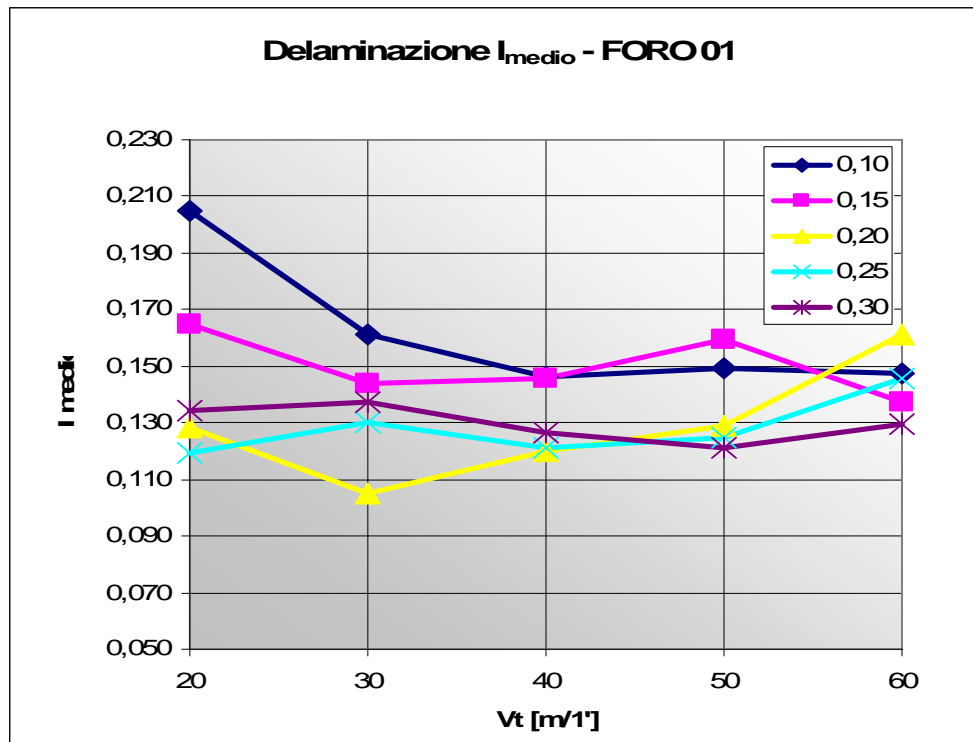


Fig. 5.12.a – Andamento della forza di penetrazione F_x al variare della velocità di taglio e con avanzamento fissato per le varie serie da 0.1 a 0.3 mm/giro (valori medi calcolati su 3 prove)

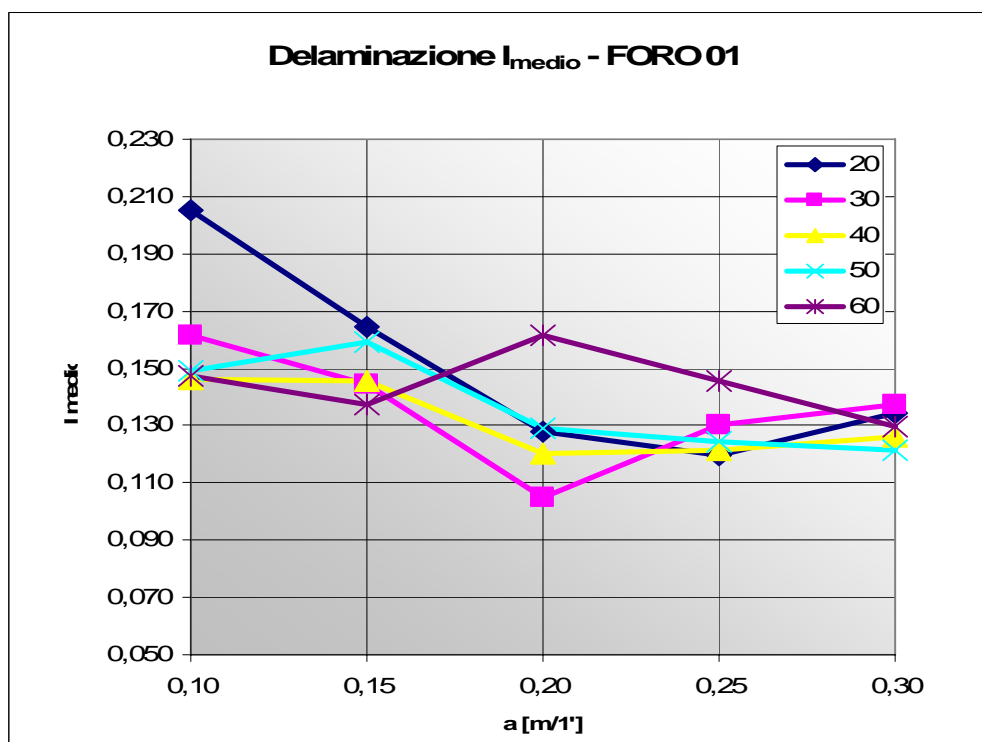


Fig. 5.12.b – Andamento della forza di penetrazione F_x al variare dell'avanzamento e con velocità di taglio fissata per le varie serie da 20 a 60 m/min (valori medi calcolati su 3 prove)

La ripetizione delle prove ha confermato, come atteso, i risultati del primo test. Si riporta pertanto per brevità solo l'andamento della delaminazione in funzione di velocità di taglio ed avanzamento nelle figg. 5.12.a e 5.12.b.

6. IL CONTROLLORE

6.1. Premessa

La tecnica TCM, combinata con un sistema di controllo dei parametri di taglio diventa un potente strumento nella lavorazione di manufatti in CFRP. La scelta dei parametri di taglio in foratura assume una notevole rilevanza in quanto è necessario stabilire il giusto compromesso in grado di massimizzare sia la produttività che la qualità del foro, minimizzando i costi. Il controllore dovrà perciò utilizzare i parametri di taglio più adatti, scelti in base alla precedente analisi TCM, e variarli al progredire dell'usura in modo da poter sfruttare al massimo la vita utile dell'utensile riducendone la possibilità di rottura inaspettata e di conseguenza lo scarto del pezzo in lavorazione.

6.2. Il controllore a logica fuzzy

Si possono quindi utilizzare i dati ricavati dal monitoraggio online e dalle rilevazioni di usura e danneggiamento per realizzare un controllo del processo di foratura. Risulta però difficile realizzare un preciso modello matematico da implementare in un comune controllo in retroazione in quanto le variabili che governano il processo sono molteplici ed i legami non sempre ben definiti. La *logica Fuzzy*, in grado di trattare problemi intrinsecamente non ben definiti e per i quali risulta difficile se non impossibile costruire un modello matematico esatto, risulta perciò adeguata allo scopo preposto. In questo studio viene quindi eseguita una analisi qualitativa delle possibilità offerte da un controllore basato su logica fuzzy nella lavorazione di foratura delle CFRP. Si è quindi lasciata in secondo piano la definizione delle membership function e gli universi di definizione dei vari fuzzy set. Le regole inoltre sono state formulate in base alla conoscenza acquisita dallo studio dei contributi in letteratura [3, 4, 5, 6, 7].

6.2.1. Logica di funzionamento

Il processo logico che è alla base del controllore proposto prevede l'acquisizione in ingresso delle grandezze direttamente misurate o indirettamente ricavate con l'analisi TCM per realizzare una stima della delaminazione procurata al composito; in base a questa effettua una regolazione del parametro di avanzamento in modo da massimizzare la qualità del foro (fig. 6.1). Sia la stima della delaminazione che la regolazione dell'avanzamento vengono effettuate mediante processo inferenziale usando valori linguistici all'interno di regole del tipo *IF...THEN....*



Fig. 6.1 – Schema logico del controllore fuzzy

6.2.2. Definizione delle variabili di controllo.

Come primo passo per la realizzazione del sistema fuzzy sono state definite le variabili di ingresso e le uscite. In particolare, in questo studio, si è scelto di utilizzare in ingresso i valori della forza di penetrazione F_x e l'usura dell'utensile, che come riscontrato dalle analisi TCM, sono i parametri che più influiscono sulla qualità del foro realizzato. Mentre il valore della F_x viene continuamente registrato dai sensori l'usura non può essere misurata né direttamente durante la lavorazione né tra un'operazione e l'altra. Questa deve essere perciò ricavata dalle lavorazioni pregresse effettuate dall'utensile ipotizzando una legge che leghi l'usura ai metri lavorati. Migliore sarà questa stima tanto più efficace sarà il controllo che ne deriva.

I valori di ciascuna variabile, parole come “alta”, “media”, “bassa”, sono detti termini e sono rappresentati da numeri fuzzy su universi che sono sottoinsiemi dei numeri reali: i suddetti universi rappresentano le variabili linguistiche (fig. 6.2).

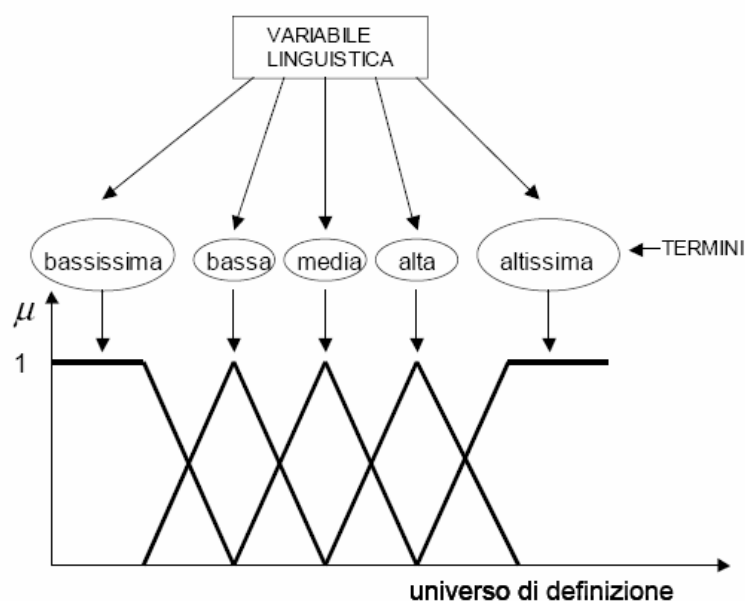


Fig. 6.2 – Rappresentazione di variabile linguistica, termini ed universo di definizione.

Il numero di termini in genere varia da 2 a 7 in funzione delle necessità e della precisione delle informazioni disponibili sulle variabili linguistiche. Nel caso in esame sono stati usati 5 termini per ciascuna variabile (molto basso, basso, medio, alto, molto alto).

Per completare la definizione degli insiemi fuzzy si è effettuata, per ciascuna variabile, la scelta delle membership function. Queste determinano il grado di appartenenza dei valori a ciascun insieme.

Per la forza di penetrazione è stata utilizzata una funzione di appartenenza di tipo sinusoidale dopo una ricerca comparativa tra quelle più utilizzate per rappresentare questa grandezza in esperienze analoghe [4]. Per l'usura è stata invece scelta una membership function trapezoidale in quanto è difficile quantificare esattamente a quale percentuale della vita utile (usura) corrisponde un livello della variabile linguistica come "molto basso, basso, medio, ecc.". Un ragionamento simile ha portato all'utilizzo della funzione trapezoidale anche per la delaminazione.

Per la variabile di uscita, l'avanzamento, la scelta è caduta su una funzione triangolare centrale dopo l'analisi comparativa dei lavori in letteratura [4].

Per ognuna di queste variabili è concessa la sovrapposizione solo alle funzioni che rappresentano numeri fuzzy adiacenti: quindi ciascun valore che viene fuzzyficato ha grado di appartenenza diverso da 0 al massimo per 2 fuzzy set. In fig. 6.3 sono riportate le rappresentazioni delle variabili linguistiche utilizzate.

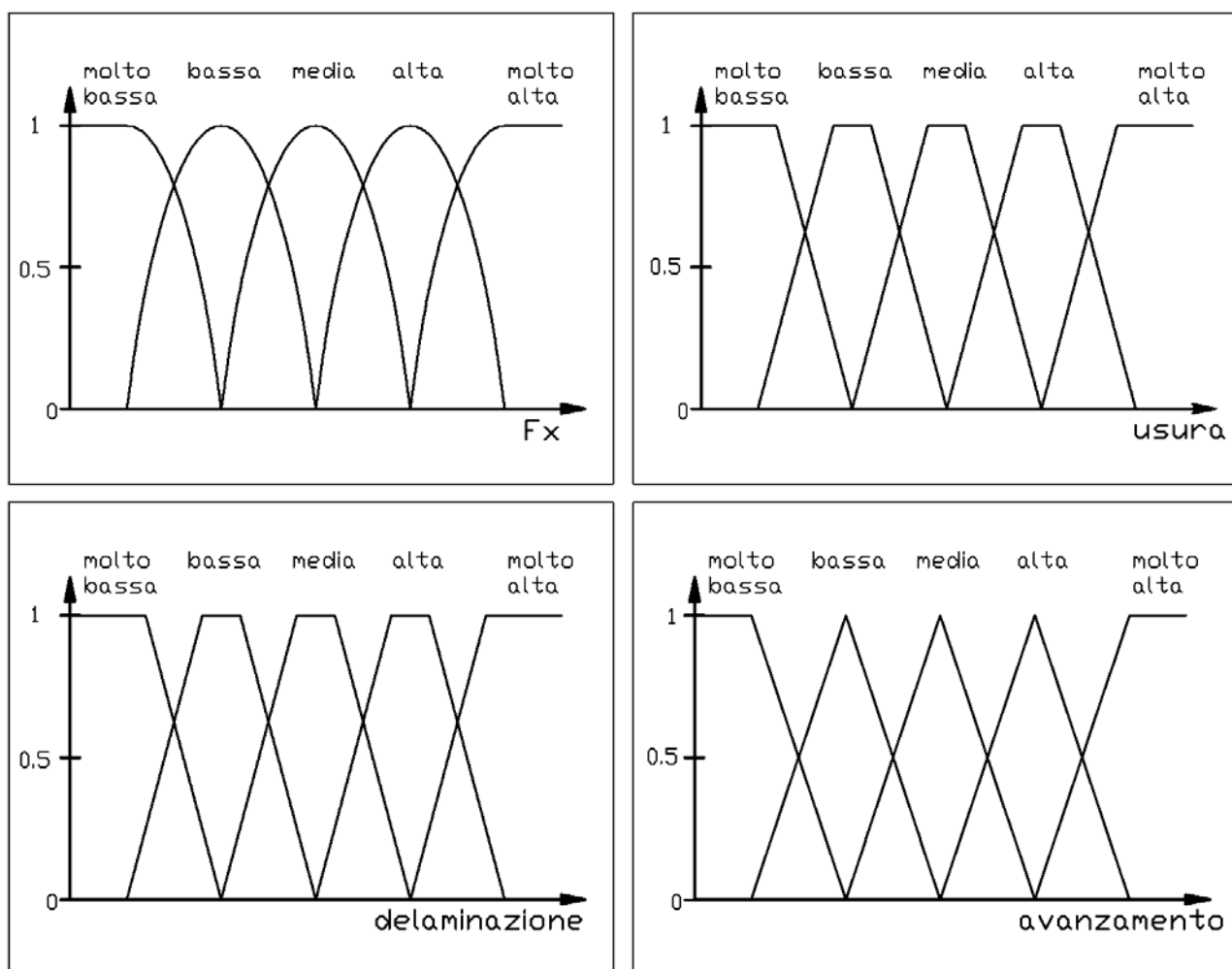


Fig. 6.3 – Rappresentazione delle variabili linguistiche utilizzate dal controllore

6.2.3. Definizione delle regole di inferenza.

Il passo successivo consiste nello scrivere le regole di inferenza. Queste sono del tipo “IF... THEN...” e possono essere combinate tra loro per realizzare delle proposizioni anche complesse. Il numero delle regole possibili è dato dal prodotto dei termini di ciascuna variabile linguistica in ingresso: le regole produrranno un numero di uscite diverse uguale al numero di termini della variabile di uscita. Le suddette regole contengono la conoscenza di base e descrivono l’evolversi del processo e come effettuarne il controllo.

Nel caso del processo inferenziale di stima della delaminazione (inferenza 1 in fig. 6.1) le regole sono del tipo:

“se la forza di penetrazione è alta e l’usura è alta allora la delaminazione è alta”

In totale le regole sono $5 \times 5 = 25$ e vengono rappresentate in una matrice rettangolare detta tabella di decisione i cui elementi sono le conclusioni delle varie regole. In fig. 6.4 è riportata la tabella decisionale con la relativa legenda dei termini linguistici.

Regole di inferenza per la stima della delaminazione			
regola	F_x	usura	Delaminazione
1	mb	mb	molto bassa
2	b	mb	
3	mb	b	bassa
4	b	b	
5	m	mb	
6	m	b	
7	a	mb	
8	mb	m	media
9	b	m	
10	m	m	
11	a	b	
12	ma	mb	
13	mb	a	alta
14	mb	ma	
15	b	a	
16	m	a	
17	a	m	
18	ma	b	
19	b	ma	molto alta
20	m	ma	
21	a	a	
22	a	ma	
23	ma	m	
24	ma	a	
25	ma	ma	

legenda termini	
mb	molto bassa
b	bassa
m	media
a	alta
ma	molto alta

regola 3:

"se la forza di penetrazione è molto bassa e l'usura è bassa allora la delaminazione è bassa"

regola 22:

"se la forza di penetrazione è alta e l'usura è molto alta allora la delaminazione è molto alta"

Fig. 6.4 – Tabella delle regole relative alla stima della delaminazione

Producono in totale 5 uscite che coincidono con i 5 valori della variabile linguistica “delaminazione”.

Per quanto riguarda il processo inferenziale di regolazione dell’avanzamento, essendo unica la variabile d’ingresso le regole sono soltanto 5 e sono riportate in fig. 6.5.

Regole di inferenza per la regolazione dell'avanzamento		
regola	delaminazione	avanzamento
1	molto bassa	molto alto
2	bassa	alto
3	media	medio
4	alta	basso
5	molto alta	molto basso

regola 2:

"se la delaminazione è bassa allora avanzamento alto"

Fig. 6.5 – Tabella delle regole relative alla regolazione dell’avanzamento

6.2.4. Funzionamento del controllore fuzzy

Definiti i suddetti parametri la struttura del controllore è pronta. Per spiegarne il funzionamento si fa ricorso ad un esempio; in fig. 6.6 è riportato quello riferito al processo inferenziale di stima della delaminazione.

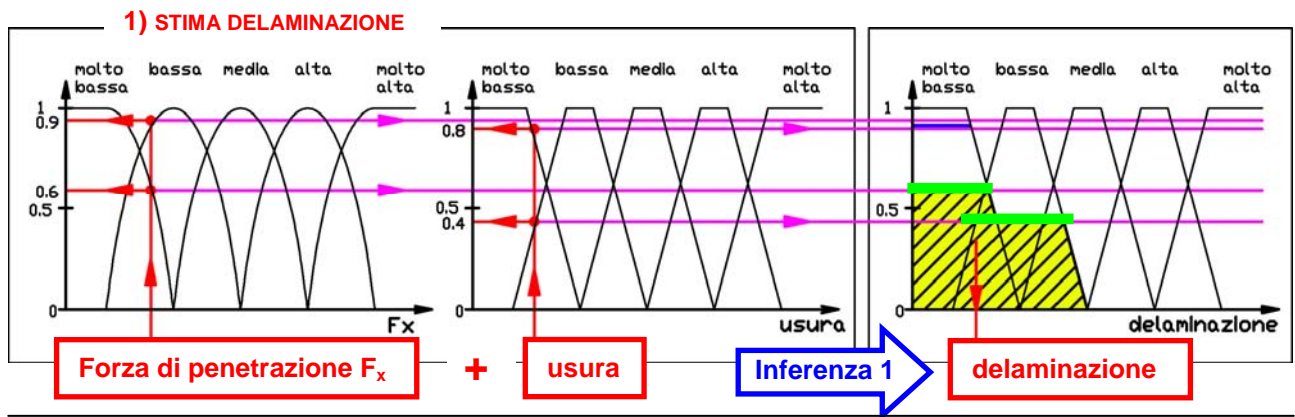


Fig. 6.6 – processo di inferenza 1: stima della delaminazione

- Le variabili in ingresso forza di penetrazione (F_{x0}) ed usura ($Usura_0$) vengono fuzzyficate mediante le rispettive membership function: sia F_{x0} che $Usura_0$ appartengono con grado di appartenenza $\mu > 0$ solo a 2 fuzzy set
- La tabella decisionale si riduce alla tabella di decisione indotta in cui solo 4 celle contengono termini diversi da 0. Accade questo per come abbiamo definito la congiunzione AND nella parte antecedente delle regole; infatti se almeno una delle funzioni di appartenenza è zero l'operatore di minimo produce zero.

Regole di inferenza per la stima della delaminazione				legenda termini	
regola	F_x	usura	Delaminazione		
1	mb	mb	molto bassa	mb	molto bassa
2	b	mb		b	bassa
3	mb	b	bassa	m	media
4	b	b		a	alta
				ma	molto alta

Fig. 6.7 – Tabella di decisione indotta

- La tabella di decisione indotta mostra che vengono applicate solo 4 regole: la congiunzione AND della parte antecedente di ogni regola definisce la “forza delle regole (α_{ij})” che sono il minimo grado di appartenenza relativo a ciascuna regola. Con tali valori viene costruita una tabella di struttura simile alla decisionale indotta sostituendo alle conclusioni la forza di ciascuna regola.
- Si calcola adesso l'uscita di controllo, definita per ciascuna regola dalla operazione di congiunzione applicata alla la sua forza (α_{ij}) e alla conclusione (C_{ij}) come segue:

uscita di controllo regola 1 $\rightarrow \min (\alpha_{ij}, C_{ij}(z))$

Il risultato delle uscite di controllo dell'inferenza 1 in fig. 6.6 è rappresentato dalle linee in colore verde che intersecano le membership function “molto bassa” e “bassa” della variabile delaminazione.

- Si effettua adesso l'aggregazione delle regole tramite l'operatore OR che restituisce i valori massimi delle varie uscite di controllo. Il risultato di questa operazione è rappresentato in fig. 6.6 dall'area tratteggiata.
- Si esegue adesso la defuzzyficazione dell'uscita aggregata tramite il metodo del centroide, realizzando così un valore univoco della stima della delaminazione

In fig. 6.7 è riportato invece lo schema dell'inferenza che realizza la regolazione dell'avanzamento utilizzando in ingresso il valore del danneggiamento stimato dal primo processo inferenziale.

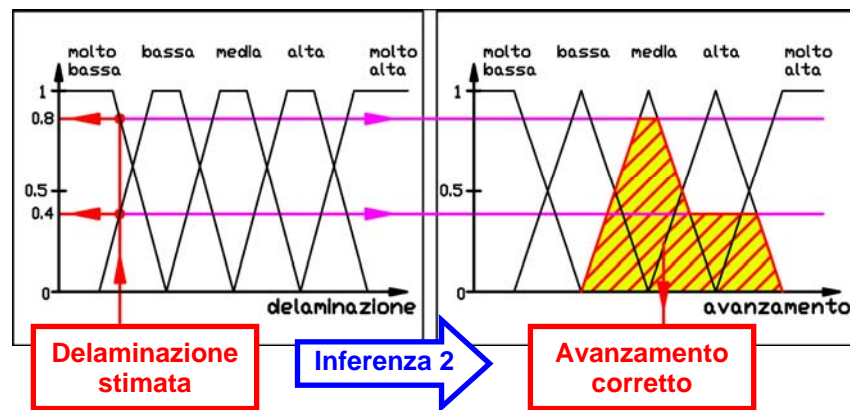


Fig. 6.6 – processo di inferenza 1: stima della delaminazione

Con procedimento analogo all'inferenza 1 si ottiene dalla delaminazione stimata un valore univoco dell'avanzamento da utilizzare per il controllo della macchina utensile.

CONCLUSIONI

Nell'ambito di questo lavoro il processo di monitoraggio dello stato dell'utensile in operazioni di foratura su materiale plastico rinforzato con fibra di carbonio è stato validato con numerose prove. È stato inoltre sviluppato, per quantificare l'usura e la delaminazione, un apparato di misura flessibile basato su uno stereomicroscopio dotato di fotocamera digitale e software per l'analisi dell'immagine. La procedura garantisce alta precisione ed elevata ripetibilità delle misure: il sistema è inoltre facilmente implementabile nella linea produttiva. Per migliorare ed automatizzare il sistema, rendendolo indipendente dalla soggettività dell'operatore, è possibile utilizzare sul microscopio un illuminatore episcopico coassiale; questo garantisce un'immagine sufficientemente contrastata, tale da poter effettuare con successo la selezione tramite binarizzazione anche per l'area danneggiata.

Il suddetto sistema è stato validato con successo tramite prove di ripetibilità.

L'analisi approfondita del processo tramite prove di foratura con diverse combinazioni V_f - a ha evidenziato, per questa combinazione pezzo/utensile, una rilevante dipendenza della forza di penetrazione F_x dall'usura della punta. La F_x misurata difatti cresce con la velocità di taglio e rimane pressoché costante all'aumentare dell'avanzamento. Si è inoltre rilevato un danneggiamento maggiormente pronunciato in corrispondenza di bassi valori di avanzamento e velocità di taglio, in controtendenza a quanto riportato in letteratura.

È stata infine proposta una possibile procedura di controllo per il processo di foratura basata su logica fuzzy: questa, senza la necessità di un preciso modello matematico, dovrebbe fornire una stima della delaminazione e su questa effettuare la regolazione dell'avanzamento per massimizzare la produttività e la qualità del foro minimizzando i costi (tempi passivi, scarti, rotture utensile).

SVILUPPI FUTURI

Il presente lavoro ha impostato le linee guida per la realizzazione di un controllore del processo di foratura basato su logica fuzzy che verrà realizzato in un ulteriore lavoro di tesi. È stata infatti realizzata un'analisi preliminare sulle specifiche da soddisfare, la struttura e le potenzialità dell'eventuale controllore.

Si dovranno perciò implementare i suddetti processi utilizzando gli appositi software e hardware in commercio in modo tale che entrambi i processi inferenziali descritti nel paragrafo 6.2 vengano eseguiti automaticamente e continuamente durante il monitoraggio on-line.

Dovranno inoltre essere eseguite ulteriori prove utilizzando utensili con resistenza all'usura notevolmente superiore a quella delle punte in HSS di questo studio preliminare: infatti per questi utensili, dal basso costo e dalla resistenza ad usura ridotta non è economico utilizzare un controllo sui parametri di taglio durante la foratura.

Questo tipo di controllo dei parametri di taglio diventa economico quando si utilizzano utensili dal costo maggiore che garantiscono una superiore durata e mantengono una buona qualità del foro per un elevato numero di lavorazioni. Per poter quindi utilizzare una procedura di questo tipo si dovranno quindi eseguire delle prove di foratura per poter definire la struttura del sistema fuzzy; maggiori saranno queste prove, migliore sarà il risultato ottenuto.

Per limitare il numero delle prove, e quindi i loro costi, potrebbe essere possibile analizzare l'intera vita utile del tipo di utensile utilizzato realizzando le prove esplorative partendo da utensili con differente grado di usura i quali saranno sicuramente disponibili nel magazzino utensili dell'officina.

Si potrà inoltre ampliare il controllore utilizzando altri ingressi quali la coppia di taglio tralasciata per quanto riguarda questa analisi preliminare.

Per massimizzare la produttività l'avanzamento deve essere mantenuto sempre al massimo valore possibile: è inutile, anzi dannoso dal punto di vista della produttività, effettuare una regolazione per evitare la delaminazione nelle zone centrali dello spessore dove questo fenomeno non può concretizzarsi. Collegando quindi il sistema di riferimento della macchina utensile al sistema di controllo è possibile escludere il controllo dell'avanzamento dove questo non è necessario massimizzando la produttività.

Inoltre, per migliorare i risultati ottenuti dal monitoraggio dell'utensile, e renderli completamente indipendenti dalla valutazione dell'operatore si potrà utilizzare, durante la misurazione del

adnneggiamiento, un illuminatore episcopico coassiale che garantisca un'immagine sufficientemente contrastata da poter ottenere la misura del danneggiamento tramite la binarizzazione dell'immagine anziché la selezione manuale con definizione del contorno.

BIBLIOGRAFIA

- [1] W. F. Smith, **Scienza e tecnologia dei materiali**, Mc Graw-Hill, 1995
- [3] J. P. Davim, Pedro Reis, "Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments", *Composite Structures*, n.59, 2003, pp.481-487
- [4] F. R. Biglari, X. D. Fang, "Real-time fuzzy logic control for maximising the tool life of small-diameter", *Fuzzy sets and systems*, n.72, 1995, pp.91-101
- [5] A. Thadani, A. H. Sonl, "Fuzzy logic in hole drilling of composite", ASME 1994
- [6] Ho-Cheng H., Dharan, "Delamination during drilling in composite laminates", *Journal of Engineering for Industry, Transaction of the ASME*, vol.112, n.3, 1990, pp.236-239
- [7] O. Yumak, H. Metin Ertunc, "Tool wear condition monitoring in drilling process using fuzzy logic", *ICONIP 2006*, part III, pp.508-517
- [8] B. Lazzerini, "Introduzione agli Insiemi Fuzzy e alla Logica Fuzzy", (DISPENSE DEL CORSO "Sistemi intelligenti di supporto alle decisioni")
- [9] F. Fossati, "Pensare in logica fuzzy", *Elettronica oggi*, n.153, 1993, pp. 39-59
- [10] G. Zorzini, "Principi di logica fuzzy", *La Termotecnica*, Dicembre 1998, pp. 91-100
- [11] G. Dini, "On-line prediction of Delamination in Drilling of GFRP by using N.N approach", *Machining science and technology*, vol. 7, n.3, 2003, pp.295-314
- [12] R. Stone, K. Krishnamurthy, "A N.N. thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates", *International Journal Machining Tool Manufacturing*, vol.36, n.9, 1996, pp.985-1003.
- [13] M. Sakakura, I. Inasaki, "A N.N. approach to the decision-making process for grinding operation", *Annals of the CIRP*, vol. 41/1/1992, pp. 353-356
- [14] V. Zandomenighi, "Studio riguardante un sistema di controllo dello stato dell'utensile e della foratura di materiali compositi a matrice plastica", 2007, pp. 41-72
- [15] NIKON "Stereoscopic Zoom Microscopes SMZ 1000 SMZ 800" brochure
- [16] M. Poli "Manuale d'installazione e d'uso EasyView", 2006